

MARLO ANTONIO RIBEIRO MARTINS

**GERAÇÃO DE ORTOIMAGENS A PARTIR DE GEORREFERENCIAMENTO
DIRETO DE IMAGENS DIGITAIS AÉREAS DE PEQUENO FORMATO
COM DADOS LIDAR**

Dissertação apresentada como requisito parcial à
obtenção do grau de Mestre em Ciências
Geodésicas ao Curso de Pós-Graduação em
Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra,
Universidade Federal do Paraná.
Orientador: Prof. Dr. Edson A. Mitishita

CURITIBA
2010


TERMO DE APROVAÇÃO

MARLO ANTONIO RIBEIRO MARTINS

“GERAÇÃO DE ORTOIMAGENS A PARTIR DE
GEORREFERENCIAMENTO DIRETO DE IMAGENS
DIGITAIS AÉREAS DE PEQUENO FORMATO COM DADOS LIDAR”

Dissertação nº 233 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:



Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita
Departamento de Geomática, UFPR



Prof. Dr. Irineu da Silva
Universidade de São Paulo - São Carlos, USP/SC



Prof. Dr. Quintino Dalmolin
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 25 de fevereiro de 2010.

DEDICATÓRIA

Dedico esta obra a quem sempre me deu amor, incentivo e educação,

a minha amada mãe, Dailza Damas, que talvez por nunca ter tido oportunidade de frequentar uma universidade, insistia orgulhosamente em me chamar de doutor, desde que me graduei no curso de engenharia, e também a minha esposa Luana, com profunda gratidão, pelo apoio e paciência.

“A felicidade só existe quando compartilhada.”

(Christopher Johnson McCandless)

AGRADECIMENTOS

O autor deseja externar seus agradecimentos aos professores e aos colaboradores abaixo relacionados:

- ✓ Ao Professor e Orientador Dr. Edson A. Mitishita, do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, que acreditou no potencial da pesquisa, obrigado pela confiança;
- ✓ Ao Professor Dr. Pedro Faggion, do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, que apoiou a pesquisa, obrigado pelo apoio;
- ✓ Aos meus primos Bruno Damas e Tiago Damas, que me apoiaram dividindo os momentos de problemas e soluções, obrigado pelos conselhos pessoais;
- ✓ Aos colegas do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, pelo apoio e suporte técnico;
- ✓ A equipe da Divisão de Informações Georreferenciáveis do LACTEC, que contribuíram com o desenvolvimento da pesquisa;
- ✓ Aos amigos grandes amigos Henrique Scremin, Leandro Coradim, William Lobato e Alexander Rodrigues, que colaboram com o meu crescimento profissional e pessoal;
- ✓ Ao LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, que viabilizou a pesquisa disponibilizando os dados do Sistema Laser, as imagens digitais aéreas e as ferramentas para o desenvolvimento da pesquisa;
- ✓ Ao órgão nacional de fomento CNPq, que apoiou o mestrado subsidiando uma parte dos estudos e da pesquisa;
- ✓ À Universidade Federal do Paraná e ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, que contribuíram com os meus conhecimentos de graduação e pós-graduação.
- ✓ Aos participantes da banca examinadora por aceitarem o convite e pelas sugestões recomendadas, objetivando engrandecer o trabalho e torná-lo de qualidade.

RESUMO

Uma das mais recentes tecnologias que apareceu no mercado para auxiliar mapeamento cartográfico, é o Sistema Laser Scanner Aerotransportado – SLSA, que gera uma nuvem de pontos da superfície com alta precisão. A informação altimétrica do SLSA associada as imagens aéreas de alta resolução permitem obter ortofotos com rapidez e precisão. Porém, esta associação geralmente é realizada utilizando dados de distintos levantamentos, ou seja, um levantamento para os dados do SLSA e outro para as imagens aéreas. O ideal seria que esta associação fosse simultânea, em um único levantamento com a determinação direta dos parâmetros de orientação exterior – POE das imagens aéreas. Considerando o exposto, a pesquisa realizou esta união simultânea do SLSA com a Câmara Digital de Pequeno Formato – CDPF, com o objetivo de confeccionar uma ortofoto, visando tempo, precisão, produção e custo. Esta integração surgiu com a possibilidade de utilização do Sistema de Navegação Inercial – SNI do SLSA para orientar as imagens aéreas digitais oriundas da CDPF de maneira direta. Para realizar esta integração foi realizado um aerolevantamento em uma região com alvos pré sinalizados, com o SLSA e a CDPF simultâneos. Após o voo foi determinado o braço e o giro (ΔX_0 , ΔY_0 , ΔZ_0 , $\Delta \kappa$, $\Delta \phi$, $\Delta \omega$) da CDPF em relação ao SNI do SLSA. O braço foi determinado por topografia e o giro foi determinado por georreferenciamento indireto. Depois de determinado o braço e o giro foram realizados mais dois voos em distintas datas. Estes foram utilizados para a realização de quatro experimentos. Os experimentos consistiram na geração de ortofotos na escala 1/2.000 utilizando os POE do SNI do SLSA, sendo que dois experimentos não utilizaram pontos de apoio topográfico e dois utilizaram somente quatro pontos de apoio de topográfico. Os experimentos que não utilizaram os pontos de apoio não atingiram a exatidão da escala 1/2.000 proposta inicialmente, sendo que um atingiu a exatidão da escala 1/5.000 e o outro a exatidão da escala 1/10.000. Já os experimentos que utilizaram os quatro pontos de apoio atingiram a exatidão da escala 1/2.000, sendo que um experimento atingiu a exatidão da escala proposta e o outro atingiu a exatidão da escala 1/1.000.

Palavras Chave: Integração, Laser Scanner Aerotransportado, Câmara Digital de Pequeno Formato, Ortofoto Digital.

ABSTRACT

One of the latest technologies that have appeared in the market to help the cartographic mapping is the Airborne Laser Scanner System – ALSS, which generates digital surface models more accurately. The ALSS altitude information, associated to high resolution images, allow to obtain accurate orthophotos quickly. However, this association is usually done by using data from different surveys. A survey for data obtained from the ALSS and another one for the aerial imagery. In ideal terms, these associations should be done simultaneously, in a single survey with the direct determination of the exterior orientation parameters – POE from the aerial images. All these aspects considered, the research carried out the union of the ALSS to the Digital Camera Small Format – DCSF, in order to produce the orthophotos in a quicker, more accurate and less expensive process. This integration is possible because of the Inertial Navigation System – INS of the ALSS that directly guides the digital aerial images from the DCSF. In order to achieve this integration, it was carried out an airborne in a region with previously marked targets, using the ALSS and the DCSF simultaneously. After the flight, the arm and the spin in relation to the INS in the ALSS were established (ΔX_0 , ΔY_0 , ΔZ_0 , $\Delta \kappa$, $\Delta \phi$, $\Delta \omega$). The arm was established by topography and the spin by indirect georeferencing. After this, two other flights were performed in different dates. These flights were used to carry out four experiments. These experiments consisted of producing orthophotos at the scale of 1/2.000, using the EOP of the INS in the ALSS. Two of them didn't use any control points, but they didn't reach the proposed accuracy. The first one, reached accuracy of the scale of 1/5.000 and the second one achieved the accuracy of the scale of 1/10.000. On the other hand, the experiments that used four control points reached the accuracy of the scales of 1/2.000 and 1/1.000.

Key Words: Integration, Airborne Laser Scanner, Digital Camera Small Format, Digital Orthophoto.

RESUMEN

Una de las últimas tecnologías que aparecieron en el mercado para ayudar a los mapas cartográficos es el Sistema Láser Scanner Aerotransportado – SLSA, que genera modelos digitales de superficie con gran precisión. La Información de altitud del SLSA asociados con imágenes de alta resolución permiten obtener ortofotos con rapidez y precisión. Sin embargo, esta asociación se realiza generalmente utilizando datos de distintos levantamientos, o sea, un levantamiento de datos para el SLSA y otro para las imágenes aéreas. El ideal sería que esta asociación fuera en el mismo levantamiento con la determinación directa de los parámetros de orientación exterior – POE de las imágenes aéreas. Teniendo en cuenta el anterior, la investigación lleva a cabo esta unión del SLSA con la Cámara Digital de Pequeño Formato – CDPF, con el fin de producir una ortofoto mirando el tiempo, la precisión, la producción y el costo. Esta integración se inició con la posibilidad de utilizar el sistema de navegación inercial – sin del SLSA para orientar las imágenes aéreas procedentes de la CDPF directamente. Para lograr esta integración se catalogo una región con señales pre-marcados, para realizar el vuelo con el SLSA y la CDPF simultáneamente. Después del vuelo se determinó el brazo y el giro (ΔX_0 , ΔY_0 , ΔZ_0 , $\Delta \kappa$, $\Delta \phi$, $\Delta \omega$) de la CDPF en relación al SNI del SLSA. El brazo fue determinado por la topografía y el giro se determinó mediante la georeferenciación indirecta. Después de determinar el brazo y el giro se realizaron más dos vuelos en fechas diferentes. Estos fueron utilizados para realizar cuatro experimentos. Los experimentos consistieron en la generación de ortofotos en la escala 1/2.000 mediante el POE del SNI del SLSA. Dos experimentos no utilizaron puntos de apoyo y dos utilizaron solamente cuatro puntos de apoyo. Los experimentos que no utilizaron los puntos de apoyo no llegó a la exactitud de la escala 1/2.000, propuesto inicialmente, siendo que uno alcanzo la exactitud de la escala 1/5.000 y el otro alcanzó la exactitud de la escala 1/10.000. Los experimentos que utilizaron los cuatro puntos de apoyo alcanzaron la exactitud de la escala 1/2.000, siendo que uno llegó a la exactitud de la escala y el otro alcanzó la exactitud de la escala 1/1.000.

Palabras Clave: Integración, Sistema Láser Scanner Aerotransportado, Cámara Digital de Pequeño Formato, Ortofoto Digital.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	05
RESUMO	06
ABSTRACT	07
RESUMEN	08
SUMÁRIO	09
LISTA DE ABREVIATURAS	12
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	15
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS	18
1.1.1 Objetivo Geral	18
1.1.2 Objetivos Específicos	18
1.2 JUSTIFICATIVA	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 FOTOGRAMETRIA	20
2.1.1 Fotogrametria Digital	20
2.1.1.1 Câmara Digital de Pequeno Formato – CDPF	21
2.1.2 Parâmetros de Orientação Interior – POI	22
2.1.3 Parâmetros de Orientação Exterior – POE	23
2.1.3.1 Georreferenciamento Indireto	23
2.1.3.2 Georreferenciamento Direto	24
2.1.3.2.1 “Global Navigation Satellite Systems”– GNSS	24
2.1.3.2.2 Unidade de Medida Inercial – UMI	28
2.1.3.2.3 Sistema de Navegação Inercial – SNI	38
2.1.4 Ortofoto Digital	41
2.2 SISTEMA LASER SCANNER AEROTRANSPORTADO – SLSA	43
2.2.1 Considerações Gerais	43
2.2.2 Princípio de Funcionamento	45
2.2.3 Componentes Básicos	46
2.2.4 Produtos Gerados	48
2.2.5 Aplicações dos Dados	49

	10
2.2.6 Fabricantes	52
2.2.7 Comparação do SLISA x Fotogrametria	52
2.3 ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DO AEROLEVANTAMENTO	53
2.3.1 Etapa Aérea	53
2.3.2 Etapa Terrestre	58
3 MATERIAL E MÉTODO	61
3.1 MATERIAL	61
3.1.1 Especificação Técnica do SLISA	63
3.1.2 Especificação Técnica da CDPF	65
3.1.3 Certificado de Calibração da CDPF	66
3.1.4 Integração da CDPF com o SLISA	67
3.1.5 Campo de Calibração	70
3.2 MÉTODO	72
3.2.1 Determinação do Braço e do Giro (ΔX_0 , ΔY_0 , ΔZ_0 , $\Delta \omega$, $\Delta \phi$, $\Delta \kappa$), via Sistema de Navegação Inercial do SLISA	72
3.2.1.1 Procedimento Aéreo e Terrestre	73
3.2.1.2 Processamento do SNI do SLISA	73
3.2.1.3 Determinação do Braço (ΔX_0 , ΔY_0 , ΔZ_0)	75
3.2.1.4 Determinação da rotação (ω , ϕ , κ) dos POE de cada imagem	76
3.2.1.5 Determinação do Giro ($\Delta \omega$, $\Delta \phi$, $\Delta \kappa$)	78
3.2.2 Produção de Ortofotos	80
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	84
4.1 DETERMINAÇÃO DO GIRO ENTRE SNI DO SLISA E CDPF	84
4.2 EXPERIMENTO A – PRODUÇÃO DE ORTOFOTOS NA ESCALA 1/2.000, COM PONTOS DE APOIO TOPOGRÁFICOS, DO VOO REALIZADO EM 24/10/2006 PELO GEORREFERENCIAMENTO INDIRETO	91
4.3 EXPERIMENTO B – PRODUÇÃO DE ORTOFOTOS NA ESCALA 1/2.000, SEM PONTOS DE APOIO TOPOGRÁFICOS, DO VOO REALIZADO EM 20/09/2007	97
4.4 EXPERIMENTO C – PRODUÇÃO DE ORTOFOTOS NA ESCALA 1/2.000, COM PONTOS DE APOIO TOPOGRÁFICOS, DO VOO REALIZADO EM 20/09/2007	103
4.5 EXPERIMENTO D – PRODUÇÃO DE ORTOFOTOS NA ESCALA 1/2.000, SEM PONTOS DE APOIO TOPOGRÁFICOS, DO VOO REALIZADO EM 07/05/2006	108

4.6 EXPERIMENTO E – PRODUÇÃO DE ORTOFOTOS NA ESCALA 1/2.000, COM PONTOS DE APOIO TOPOGRÁFICOS, DO VOO REALIZADO EM 07/05/2006	113
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	117
5.1 CONCLUSÕES	117
5.1.1 Classificação das Ortofotos Produzidas nos Experimentos	118
5.2 RECOMENDAÇÕES	122
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124

LISTA DE ABREVIATURAS

SLSA	: Sistema Laser Scanner Aerotransportado
LiDAR	: <i>“Light Detection and Ranging”</i>
ALS	: <i>“Airborne Laser Scanning”</i>
ALTM	: <i>“Airborne Laser Terrain Mapper”</i>
MDT	: Modelo Digital do Terreno
MDE	: Modelo Digital de Elevação
CDPF	: Câmara Digital de Pequeno Formato
POI	: Parâmetros de Orientação Interior
POE	: Parâmetros de Orientação Exterior
CCD	: <i>“Charge Coupled Device”</i>
CMOS	: <i>“Complementary Metal Oxide Semiconductor”</i>
JFET	: <i>“Junction Field Effect Transistor”</i>
APS	: <i>“Active Pixel Sensor”</i>
GNSS	: <i>“Global Navigation Satellite Systems”</i>
NAVSTAR	: <i>“Navigation System with Time and Ranging”</i>
GPS	: <i>“Global Positioning System ”</i>
PDOP	: <i>“Position Dilution of Precision”</i>
GLONASS	: <i>“Global Navigation Satellite System”</i>
UMI	: Unidade de Medida Inercial
IMU	: <i>“Inertial Measurement Unit”</i>
SNI	: Sistema de Navegação Inercial
INS	: <i>“Inertial Navigation System”</i>
ECI	: <i>“Earth Centered Inertial”</i>
ECEF	: <i>“Earth Centered – Earth Fixed”</i>
NED	: <i>“North, East and Down”</i>
RPY	: <i>“Roll, Pitch and Yaw”</i>
UTM	: <i>“Universal Transversal Mercator”</i>
PEC	: Padrão de Exatidão Cartográfica
IBGE	: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
SIRGAS	: Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
RBMC	: Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
LACTEC	: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 – Sistema GNSS	25
FIGURA 02 – Sistemas de coordenadas	31
FIGURA 03 – Esquema da Unidade de Medida Inercial	35
FIGURA 04 – Funcionamento do filtro de Kalman	37
FIGURA 05 – Integração do GPS/INS por filtro descentralizado de Kalman	40
FIGURA 06 – Comparação entre Fotografia Aérea e Ortofoto Digital	41
FIGURA 07 – Exemplo de SLSA Topográfico Aéreo	45
FIGURA 08 – Representação do primeiro e do último pulso laser	46
FIGURA 09 – Componentes do SLSA	47
FIGURA 10 – Computador de Controle	47
FIGURA 11 – Sensor Laser	47
FIGURA 12 – Imagem de Intensidade	48
FIGURA 13 – Imagem de Hipsometria	48
FIGURA 14 – Modelo Digital de Elevação (MDE)	49
FIGURA 15 – Modelo Digital de Terreno (MDT)	49
FIGURA 16 – Perfil do Nuvem de Pontos Tridimensional da Mata Atlântica	50
FIGURA 17 – Modelo Tridimensional Urbano	50
FIGURA 18 – Mapas de Enchente, Tempo Inicial	51
FIGURA 19 – Mapas de Enchente, Tempo Final	51
FIGURA 20 – Secção Transversal da Linha de Transmissão	51
FIGURA 21 – Área Circular (52%) de Utilização das Fotografias, valores em milímetros	57
FIGURA 22 – Tela de Navegação do ALTM-NAV	58
FIGURA 23 – Distância limite da base utilizada e componentes do SLSA	59
FIGURA 24 – Laser Scanner Aerotransportado, modelo ALTM 2050	64
FIGURA 25 – Câmara Digital, modelo KODAK DCS Pro14n	65
FIGURA 26 – Alvos do Campo de Calibração	66
FIGURA 27 – Caixa de Fixação, Espuma de Poliuretano e Cabos de Conexão (Vista Inferior)	67
FIGURA 28 – Espuma de Poliuretano e Cabos de Conexão (Vista Superior) ...	67
FIGURA 29 – Cabo de Conexão	68
FIGURA 30 – Fluxograma da Integração	68

	14
FIGURA 31 – Montagem da CDPF na Aeronave (Interno)	69
FIGURA 32 – Montagem da CDPF na Aeronave (Externo)	69
FIGURA 33 – Confeção dos Alvos Pré-sinalizados	70
FIGURA 34 – Alvos Pré-sinalizados	70
FIGURA 35 – Localização e Distribuição dos Alvos Pré-sinalizados	71
FIGURA 36 – Fluxograma da Determinação do Braço e do Giro	72
FIGURA 37 – Fluxograma de Processamento do SNI do SLSA	74
FIGURA 38 – Determinação de X_0, Y_0, Z_0 da Fotografia	75
FIGURA 39 – Determinação da rotação dos POE de cada imagem	76
FIGURA 40 – Pontos homólogos entre imagens e entre faixa	77
FIGURA 41 – Determinação de pontos homólogos	78
FIGURA 42 – Quadrantes da Relação Matemática dos Ângulos	79
FIGURA 43 – Determinação do vetor $\Delta x_{\text{câmara}}$	80
FIGURA 44 – Processamento dos Dados Brutos do Laser no Software REALM	82

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 – Comparação do Laser Scanner x Fotogrametria	52
TABELA 02 – Vantagens do SLSA sobre a Fotogrametria	53
TABELA 03 – Vantagens da Fotogrametria sobre o SLSA	53
TABELA 04 – Espaçamento entre os Pontos	55
TABELA 05 – Tempo de rastreo em função do comprimento da linha de base ..	60
TABELA 06 – Configuração do Aerolevanteamento	63
TABELA 07 – POI (KODAK DCS Pro14n – Lente 35 mm)	66
TABELA 08 – Altura de Voo x Resolução (Lente 35mm)	71
TABELA 09 – Vetor de Distância CDPF ao SNI	75
TABELA 10 – Relação Matemática dos Ângulos entre SNI e Aerotriangulação ..	79
TABELA 11 – Resumo dos Experimentos	84
TABELA 12 – POE do SLSA no Momento da Tomada das Imagens Digitais	85
TABELA 13 – Centros Perspectivos das Imagens da CDPF	85
TABELA 14 – Desvios Padrões Atribuídos às Observações na Aerotriangulação	86
TABELA 15 – Erro Médio Quadrático (RMSE) da Aerotriangulação	86
TABELA 16 – Resíduos nos Pontos de Verificação	87
TABELA 17 – Resíduos nos Pontos de Apoio	87
TABELA 18 – POE Determinados por Aerotriangulação	88
TABELA 19 – Valores de $\Delta\omega$, $\Delta\phi$, $\Delta\kappa$	89
TABELA 20 – Determinação de $\Delta\omega$, $\Delta\phi$, $\Delta\kappa$	90
TABELA 21 – Vetor $\Delta X_{\text{câmara}}$	91
TABELA 22 – Erro Médio Quadrático (RMSE) da Aerotriangulação	92
TABELA 23 – Resíduos nos Pontos de Verificação	92
TABELA 24 – Resíduos nos Pontos de Apoio	93
TABELA 25 – Diferença entre o Levantamento de Campo (GPS) e a Ortofotos ..	94
TABELA 26 – Análise de tendência	95
TABELA 27 – Valores planimétricos do desvio padrão e PEC obtidos do decreto-lei 89.817	96
TABELA 28 – Análise de Precisão Planimétrica (Classe A)	97
TABELA 29 – POE do SLSA no Momento da Tomada das Imagens Digitais	98
TABELA 30 – POE das Imagens da CDPF	98

TABELA 31 – Desvios Padrões Atribuídos às Observações na Aerotriangulação	99
TABELA 32 – Erro Médio Quadrático (RMSE) da Aerotriangulação	99
TABELA 33 – Resíduos nos Pontos de Verificação	99
TABELA 34 – Diferença entre o Levantamento de Campo (GPS) e as Ortofotos	101
TABELA 35 – Análise de tendência	102
TABELA 36 – Análise de Precisão Planimétrica (Classe A)	103
TABELA 37 – Erro Médio Quadrático (RMSE) da Aerotriangulação	104
TABELA 38 – Resíduos nos Pontos de Verificação	104
TABELA 39 – Diferença entre o Levantamento de Campo (GPS) e as Ortofotos	105
TABELA 40 – Análise de tendência	106
TABELA 41 – Análise de Precisão Planimétrica (Classe A)	107
TABELA 42 – POE do SLSA no Momento da Tomada das Imagens Digitais	108
TABELA 43 – POE das Imagens da CDPF	109
TABELA 44 – Erro Médio Quadrático (RMSE) da Aerotriangulação	109
TABELA 45 – Resíduos nos Pontos de Verificação	110
TABELA 46 – Diferença entre o Levantamento de Campo (GPS) e as Ortofotos	111
TABELA 47 – Análise de tendência	112
TABELA 48 – Análise de Precisão Planimétrica (Classe A)	112
TABELA 49 – Erro Médio Quadrático (RMSE) da Aerotriangulação	113
TABELA 50 – Resíduos nos Pontos de Verificação	113
TABELA 51 – Diferença entre o Levantamento de Campo (GPS) e as Ortofotos	114
TABELA 52 – Análise de tendência	115
TABELA 53 – Análise de Precisão Planimétrica (Classe A)	116

1 INTRODUÇÃO

A Fotogrametria, ao longo do último século, se desenvolveu de forma a obter informações da superfície da terra com agilidade e precisão. Em paralelo, vieram os sistemas sensores aerotransportados que possibilitam a aquisição de dados topográficos densos e precisos, como é o caso do Sistema Laser Scanner Aerotransportado – SLSA. Esta tecnologia ampliou a aplicação da Fotogrametria para aplicações que exigem modelos digitais mais refinados, como por exemplo, modelagem de áreas urbanas, reservatórios de usinas hidroelétricas e linhas de transmissão.

A informação de altimetria dos objetos do SLSA unida à informação de imagens digitais aéreas de alta resolução espacial permitem ganhos significativos na extração e detecção de diferentes feições que compõem os projetos cartográficos. Esta união de informações é geralmente realizada utilizando dados de distintos levantamentos aéreos, ou seja, é realizado um aerolevanteamento com o SLSA e um outro aerolevanteamento para a aquisição das imagens digitais aéreas.

Pensando em minimizar os esforços e os custos com aerolevanteamento, seria importante realizar esta união de informações cartográficas em um único aerolevanteamento, ou seja, adquirir os dados do SLSA e imagens digitais aéreas de alta resolução simultaneamente.

Partindo do princípio de que todos os SLSA possuem um Sistema de Navegação Inercial – SNI, ou seja, as informações de orientação exterior (X'_0 , Y'_0 , Z'_0 , ω' , ϕ' , κ') do sensor do SLSA, vislumbrou-se a possibilidade da utilização destas informações não só para o processamento dos dados do SLSA, mas também para o processamento das imagens digitais aéreas de alta resolução. Para isto, é necessário uma integração da Câmara Digital de Pequeno Formato – CDPF com o SLSA no mesmo aerolevanteamento.

Observando esta possibilidade de integração e a necessidade de se minimizar os esforços com o georreferenciamento indireto das imagens digitais aéreas de pequeno formato, a presente pesquisa propõe um desenvolvimento metodológico utilizando os dados do SNI do SLSA para o georreferenciamento direto

das imagens digitais aéreas, no qual estas são obtidas simultaneamente com os dados do SLSA. Este georreferenciamento direto foi utilizado para produção de ortofotos na escala de 1/2000. Estas ortofotos serviram para analisar as exatidões alcançadas pelo georreferenciamento direto através de análises estatísticas, como também para obter as conclusões desta integração de SLSA e CDPF.

O SLSA que será utilizado nesta pesquisa é o modelo ALTM 2050 da Optech Inc., em conjunto com a Câmara Digital de Pequeno Formato – CDPF, modelo DCS Pro14n da KODAK, sendo que a CDPF é de baixo custo.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Propor o desenvolvimento metodológico para o georreferenciamento direto de imagens digitais aéreas de pequeno formato, utilizando dados do Sistema de Navegação Inercial – SNI do Sistema Laser Scanner Aerotransportado – SLSA, visando à produção de ortofotos na escala 1/2000.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Desenvolver o método de integração simultânea dos dados SLSA com a CDPF;
- b) Gerar ortofotos na escala 1/2.000 por georreferenciamento direto, ou seja, utilizando somente dados do SLSA;
- c) Gerar ortofotos na escala 1/2.000 por georreferenciamento direto, utilizando alguns pontos de apoio;
- d) Apresentar e discutir as exatidões encontradas, através dos testes de tendência e precisão (Qui-Quadrado), tendo como base o padrão de exatidão cartográfica – PEC; e
- e) Analisar as vantagens e desvantagens desta metodologia.

1.2 JUSTIFICATIVA

Observando a possibilidade de integração das tecnologias de Sistema Laser Scanner Aerotransportado – SLSA e da Câmara Digital de Pequeno Formato – CDPF, com a necessidade de se minimizar os esforços na orientação das imagens, a presente pesquisa é justificada pela redução dos custos para a geração de ortofotos. Além da diminuição dos custos, outros ganhos com esta integração podem ser vistos, tais como: a diminuição de pontos de apoio no terreno; a possibilidade de se realizar ortofotos em lugares de difícil acesso, por exemplo, florestas, áreas litorâneas e ilhas; e por fim, a rapidez na geração do produto final, pois todo o processo é automatizado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fotogrametria

2.1.1 Fotogrametria Digital

A Fotogrametria Digital pode se definida como a parte da Fotogrametria que trata dos aspectos geométricos do uso de fotografias, com a finalidade de obter valores precisos de comprimentos, alturas e formas, baseando-se no uso de imagens digitais, armazenadas em meio magnético (SILVA, 1999).

As fotografias ou imagens no formato digital podem ser obtidas através da digitalização de negativos em “*scanners*” de alta precisão geométrica e fidelidade de radiométrica ou diretamente a partir de câmaras digitais com sensores semicondutores CCD – “*Charge Coupled Device*” (dispositivo de carga acoplado), CMOS – “*Complementary Metal Oxide Semiconductor*” (Semicondutor de Metal Óxido Complementar), ou JFET – “*Junction Field Effect Transistor*” (Transistores de Efeito de Campo em Junções). Todos estes sensores registram eletronicamente a imagem e a armazenam em meio digital. O CCD ainda é o sistema mais usual, mas vem sendo sistematicamente substituído pelos CMOS. Embora estes sensores sejam basicamente compostos de um arranjo bidimensional de pequenas células semicondutoras, há diferenças substanciais entre eles como veremos a seguir.

O CCD possui um sistema sequencial de leitura da informação, todo distribuído em suas bordas, exigindo o uso de um processo de varredura. Isso faz com que seja mais lenta a composição da imagem final e maior o tempo de letargia do sistema entre duas tomadas. Seu consumo de energia é maior e sua manufatura bem mais complexa, o que eleva o preço para o consumidor final.

O CMOS efetua a conversão fóton-elétron e elétron-voltagem diretamente em cada célula sensorial, elevando a velocidade de transferência das cargas acumuladas para o conversor analógico-digital. O processo industrial utilizado em sua fabricação é o mesmo das memórias de acesso randômico e dos microprocessadores dos computadores, reduzindo o custo de fabricação. Além disso

permite a integração direta no próprio sensor de circuitos para efetuar operações de processamento de imagem. Tais sistemas são conhecidos em linguagem eletrônica como APS – “*Active Pixel Sensor*” (Sensores de Pixel Ativo).

O JFET são sistemas de APS iguais ao do CMOS, porém construídos sobre transistores de efeito de campo para se obter melhor ganho do sensor, permitindo obtenção de imagens mais nítidas, inclusive sob condições não favoráveis de iluminação.

2.1.1.1 Câmara Digital de Pequeno Formato – CDPF

A aplicação em Aerofotogrametria das câmaras analógicas de pequeno formato e recentemente as câmaras digitais de pequeno formato foi objeto de estudo de muitos pesquisadores como: Amorin et al. (1989), Disperati (1991), Barbosa (1992), Galo (1993), Amorin (1993), Schumacher (1995), Lima e Loch (1998), Santos et al. (2000), Mitishita et al. (2001), Rezende (2001), Hartmann e Svaldi (2002), Barbosa et al. (2003), Habib e Morgan (2003), Santos (2003), Machado et al. (2004), Habib e Morgan (2005), Gonçalves (2006), Machado (2006), Santos (2007) e Mitishita et al. (2008).

As câmaras analógicas/digitais de pequeno formato são aquelas que possuem os dispositivos proporcionalmente pequenos em relação aos das câmaras métricas, como exemplo: o tamanho das lentes, a distância focal, o tamanho do filme (ou atualmente tamanho do sensor), e o tamanho corpo da câmara.

Até recentemente, estas câmaras eram consideradas de baixa precisão para a execução de levantamentos com objetivos cartográficos. Esta baixa precisão estava vinculada principalmente à falta de mecanismo de planificação do filme no instante da tomada da fotografia. Além disto, a falta de marcas fiduciais para a recuperação da geometria projetiva e a baixa estabilidade do conjunto diminuía a precisão do levantamento fotogramétrico. Mesmo assim, eram apresentadas como alternativas naquelas situações em que a aplicação da Fotogrametria convencional tornava-se inviável, em função de seu custo ou de sua indisponibilidade.

Porém, com a substituição dos filmes fotográficos pelos sensores semicondutores do tipo CCD ou do tipo CMOS houve uma melhora significativa, já que estes sensores possuem suficiente rigidez e estabilidade dimensional para aplicações fotogramétricas, minimizando os problemas que eram encontrados nas câmaras analógicas de pequeno formato. Além disso, uma vez que a imagem é diretamente gerada em ambiente eletrônico, é facilitado o seu processamento com a aplicação de modelos para devida correção geométrica e radiométrica, aproveitando-se, assim, ao máximo a resolução espacial da mesma (GONÇALVES, 2006). Por essa razão, o panorama apresentado por Lima e Loch (1998) que apresentava sérias restrições à aplicação de câmaras analógicas de pequeno formato, muda para uma direção promissora às Câmaras Digitais de Pequeno Formato – CDPF, pois além de melhorias significativas no quadro de imageamento houve um aperfeiçoamento na qualidade das lentes, que nos processos de calibração apontam para uma melhoria na qualidade geométrica.

Segundo Gonçalves (2006), que analisou séries históricas de calibração constatou que não há grande variação nos parâmetros de orientação interior na CDPF, quando destinado à aplicação fotogramétrica. Para isto, CDPF deverá ser manuseada e armazenada com cuidado. Há sim indicação de que as CDPF com lentes zoom (distância focal variável) e intercambiáveis (permitem a troca de lentes) devem ter tais funções desabilitadas ou, caso utilize-se desses recursos, após cada operação, um processo de calibração deve ser executado. Fato é que o procedimento para calibrar as CDPF através de diversos campos de calibração e do método das fotos convergentes, é passível de ser utilizado rapidamente e sem grandes investimentos, o que permite recomendar a calibração antes ou depois de todo levantamento de maior porte para garantia da sua qualidade.

2.1.2 Parâmetros de Orientação Interior – POI

A orientação interior permite a reconstrução do feixe perspectivo que gerou as fotografias (ANDRADE, 1998). Logo, para Fotogrametria é necessário o conhecimento deste feixe perspectivo. Para isto, toda câmara usada num trabalho

fotogramétrico necessita de uma calibração para determinar os parâmetros de orientação interior. Estes parâmetros são: marcas fiduciais; distância focal (f); posição do ponto principal (x_0, y_0); distorção radial das lentes (K_1, K_2, K_3), distorção descentrada das lentes (P_1 e P_2); e não ortogonalidade do sensor (A, B). Como nesta pesquisa foi utilizada uma CDPF, os parâmetros de orientação interior utilizados foram f, x_0, y_0, K_1, K_2 e P_1 . Os demais parâmetros não foram utilizados por não serem significativos.

2.1.3 Parâmetros de Orientação Exterior – POE

O processo de orientação exterior, consiste na determinação da posição e atitude da câmara no instante do registro da fotografia. Os parâmetros de orientação exterior são três parâmetros de posição e três parâmetros de rotação, sendo estes referentes à posição do centro perspectivo da câmara no espaço objeto (X_0, Y_0, Z_0), enquanto as rotações definem a atitude da câmara no espaço. Estas rotações são definidas pelos ângulos de Euler (ω, ϕ, κ), (LUGNANI, 1987).

A determinação dos parâmetros de orientação exterior é essencial para a avaliação geométrica de qualquer tipo de imagem aérea, terrestre ou orbital (CRAMER et al., 1999). Para a determinação destes parâmetros em Fotogrametria são utilizados dois tipos de georreferenciamento, sendo um clássico ou indireto e outro direto.

2.1.3.1 Georreferenciamento Indireto

O método de georreferenciamento indireto utiliza um modelo matemático para o referenciamento das coordenadas dos pontos de apoio no espaço objeto e suas respectivas coordenadas no espaço imagem. O modelo matemático clássico em Fotogrametria é o das equações de colinearidade (CRAMER et al., 1999).

$$x = f \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (2.1)$$

$$y = f \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (2.2)$$

Onde: x e y são as coordenadas fotogramétricas do ponto; f é a distância focal calibrada; m_{ij} são os elementos da matriz de rotação; X_0 , Y_0 e Z_0 são as coordenadas do centro perspectivo da câmara no momento da tomada da fotografia; e X , Y e Z são as coordenadas de terreno no espaço objeto.

Assim, os pontos de controle assumem um papel fundamental no processo de georreferenciamento indireto, pois através destes, torna-se possível a materialização do referencial a ser adotado. E os parâmetros de orientação exterior de um conjunto de imagens são determinados por meio de um ajustamento por mínimos quadrados e fototriangulação por feixes de raios.

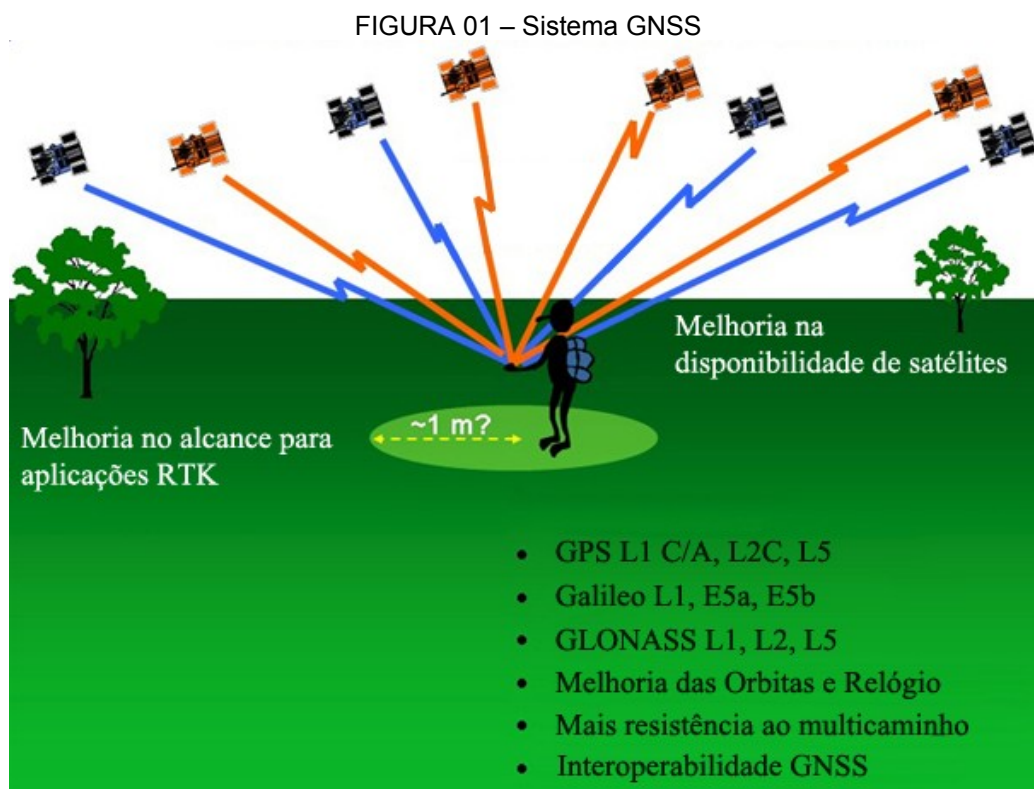
2.1.3.2 Georreferenciamento Direto

O georreferenciamento direto ou a medição direta dos parâmetros de orientação exterior do sensor de imageamento para aplicações fotogramétricas, está consolidado na combinação do “*Global Navigation Satellite Systems*” – GNSS junto com a “*Inertial Measurement Unit*” – IMU, ou Unidade de Medida Inercial – UMI. O GNSS fornece as informações de posição do centro de projeção do sensor de imageamento (X_0 , Y_0 , Z_0) no referencial geodésico, enquanto o UMI informa a atitude do sensor no espaço (ω , ϕ , κ). A união dos sensores GNSS e UMI gera um Sistema de Navegação Inercial – SNI, também conhecido como “*Inertial navigation system*” – INS. Esta união pode ser realizada em tempo real ou pós-processada, gerando os parâmetros de orientação exterior – POE.

2.1.3.2.1 “Global Navigation Satellite Systems” – GNSS

“*Global Navigation Satellite Systems*” – GNSS, ver figura 01, é o termo genérico para os sistemas de navegação por satélite. Este sistema fornece um posicionamento geoespacial com cobertura global. O GNSS permite que pequenos receptores determinem a localização (longitude, latitude e altitude) de pontos na

superfície terrestre com precisão variando de 10 m até 1 mm, dependendo do tipo de receptor empregado. A base de cálculo é o tempo de percurso do sinal de rádio transmitido do satélite até o receptor. Este sistema é muito utilizado para realizar transportes de coordenadas geodésicas, correções de trajetórias e locações de grandes obras.



FONTE: “National Oceanic and Atmospheric Administration” – NOAA, 2009.

Porém, o único sistema totalmente operacional do GNSS é o “*Navigation System with Time and Ranging / Global Positioning System*” – NAVSTAR / GPS, dos Estados Unidos da América, mais conhecido somente por GPS e conta hoje com 31 satélites. Além deste, existem outros sistemas globais de posicionamento por satélite. Um destes é o russo, denominado “ГЛОБАЛЬНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА” – ГЛОНАСС, conhecido internacionalmente com GLONASS. Este também é um GNSS, porém está em processo de restauração e conta hoje com 20 satélites. Outros sistemas GNSS são o Galileo da União Européia, que está na fase de implantação, previsto para estar operacional em 2013,

e o COMPASS / BEIDOU-2 da China, que também está na fase de implantação, previsto para estar operacional em 2015.

Nesta pesquisa, o sistema GNSS que será utilizados é o GPS. Este sistema de satélites de navegação e posicionamento geodésico foi implantado pelo Departamento de Defesa, em conjunto com o Departamento de Transportes, ambos dos Estados Unidos da América. Hoje, conta com 31 satélites, distribuídos em 6 planos orbitais quase circulares, a uma altitude de aproximadamente 20.000 km em relação ao centro da Terra.

Os planos orbitais estão inclinados de 54° , em relação ao plano equatorial e espaçados entre si por uma diferença de longitude de 30° , permitindo o posicionamento geodésico em qualquer lugar ou hora, uma vez que estão acima do horizonte de 5 a 12 satélites emitindo sinais num período de 12 h.

Os satélites NAVSTAR–GPS, emitem sinais de rádio, com os quais rastreadores portáteis podem se posicionar. Para a finalidade geodésica, a qual foi utilizada nesta pesquisa, são exigidos altos padrões de precisão, fazendo necessário o emprego do método estático e cinemático de posicionamento.

Nestes métodos, são empregados dois ou mais receptores de dupla frequência (L1/L2), a fim de se calcular as coordenadas de um ponto desconhecido ou de uma trajetória. Um dos rastreadores se posiciona no ponto desconhecido onde se deseja calcular as coordenadas (móvel) e os demais receptores (base) em pontos de coordenadas conhecidas e confiáveis de modo que todos os receptores recebam os mesmos sinais de rádio dos satélites, possibilitando a eliminação de erros de natureza sistemática, aumentando a precisão na determinação da coordenada desconhecida. Os resultados gerados são coordenadas cartesianas tridimensionais (X, Y, Z) que são transformadas para coordenadas geodésicas elipsoidais de latitude, longitude geodésica e altitude geométrica (φ , λ , h).

Nestes métodos de posicionamento, recomenda-se que os receptores, tanto o móvel como o base, sejam configurados da seguinte maneira (IBGE, 2008):

- Número mínimo de satélites:
 - ◆ Os receptores deverão observar, no mínimo, 4 satélites;
- Ângulo mínimo de elevação:

- ◆ Os receptores deverão coletar dados dos satélites com elevação superior ou igual a 15°;
- Intervalo de gravação:
 - ◆ Os receptores deverão armazenar as coordenadas tridimensionais com intervalos de 1s;
- Duração do rastreamento estático:
 - ◆ Para distâncias superiores a 100 km entre o móvel e a base deve-se rastrear, no mínimo, por 4 horas; outro item para distâncias entre 50 km e 100 km do móvel e a base, deve-se rastrear, no mínimo, 3 horas; e para distâncias inferiores a 50 km do móvel e a base, deve-se rastrear, no mínimo, por 2 horas;
- Rastreamento cinemático:
 - ◆ Antes de iniciar o caminhamento, o móvel deve ficar registrado uma posição estática de 5 a 15 min para auxílio da resolução das ambiguidades e a distância entre o móvel e a base não deve ser superior a 50 km;
- Configuração geométrica (PDOP):
 - ◆ As sessões de rastreio deverão ser programadas para serem realizadas em horários de melhor configuração geométrica dos satélites, a fim de minimizar os valores de PDOP e HDOP e maximizar o número de satélites.

O pós-processamento para o método estático consiste na determinação das distâncias de todos os satélites observados durante o tempo de rastreio. Os dados obtidos sofrerão, desde o levantamento de campo até o pós-processamento, correções de frequência, transformações de referencial e ajustamento global pelo método dos mínimos quadrados com injunções de posições, obtendo-se assim as coordenadas finais geodésicas (latitude, longitude e altitude geométrica)

São aplicadas dois tipos de injunções para o pós-processamento:

- Absolutas para os elementos orbitais;
- Relativas para os pontos de partida.

Tal procedimento permite a análise da variância da unidade de peso "a posteriori", do teste de "Qui-quadrado", dos resíduos, da matriz variância-covariância

dos parâmetros incógnitos e do grau de aproximação das ambiguidades de distâncias flutuantes para seu valor inteiro.

Para o método cinemático, o pós-processamento consiste na determinação das ambiguidades sem uma inicialização estática. Essa técnica é conhecida por “on-the-flight” – OTF. O processamento é do tipo ida e volta – “*forward-backward*”, ou seja, a trajetória é processada no sentido do levantamento e também no sentido contrário ao levantamento. Após estes dois processamentos, é realizada uma composição dos resultados, obtendo resultados melhores que a 10 cm para a posição da trajetória. O aspecto mais crítico do levantamento cinemático é a interpolação dos pontos entre os intervalos de observação (1s). Esta interpolação é realizada a partir de pontos adjacentes e tendo como algoritmo interpolador o filtro de Kalman. Este filtro de Kalman é um estimador Bayesiano, não tendencioso, consistente, eficiente e de variância mínima (CAMARGO, 1992). É, portanto, um método de se estimar o vetor estado de um modelo dinâmico a partir de observações randômicas, produzindo estimadores do vetor estado com propriedades estatísticas bem definidas. Tais propriedades são ótimas no sentido de serem não-tendenciosas e de variância mínima, entre a classe dos estimadores não tendenciosos (JUBANSKI, 2005).

2.1.3.2.2 Unidade de Medida Inercial – UMI

Uma Unidade de Medida Inercial – UMI, também conhecida como “*Inertial Measurement Unit*” – IMU é um dispositivo que realiza medições continuamente de atitude. Estas são compostas de três medidas ortogonais de aceleração linear e três de medidas angulares. A teoria de navegação inercial baseia-se na segunda lei de Newton, que descreve que todo corpo em repouso precisa de uma força para se movimentar e todo corpo em movimento precisa de uma força para parar. O corpo adquire a velocidade e sentido de acordo com a força aplicada. Ou seja, quanto mais intensa for a força resultante, maior será a aceleração adquirida pelo corpo. Quando uma força resultante atua sobre uma partícula, esta adquire uma aceleração na mesma direção e sentido da força, segundo um referencial inercial. Neste caso, a

relação entre a causa (força resultante) e o efeito (aceleração) constitui o objetivo principal da Segunda Lei de Newton, cujo enunciado pode ser simplificado assim: a resultante das forças que agem em um corpo é igual à taxa de variação do momento linear (quantidade de movimento) do mesmo em relação ao tempo.

O sistema de navegação inercial é o processo pelo qual se estabelecem informações sobre posição, velocidade, atitude (posição de um corpo que é determinada pela inclinação dos seus eixos com relação a algum sistema de referência) e direção de um veículo com relação a um referencial, utilizando informações fornecidas por sensores inerciais, tais como acelerômetros e giroscópios (TITTERTON e WESTON, 1997). Medindo-se a aceleração de um corpo, torna-se possível calcular as mudanças de velocidade e posição através de sucessivas integrações matemáticas. Movimentos rotacionais podem ser obtidos a partir de giroscópios que medem a velocidade de rotação em torno de um eixo. Basicamente, existem dois tipos de sistemas de navegação inercial: os sistemas isolados de rotação ou “*gimbaled systems*” e os sistemas não isolados de rotação ou “*strapdown systems*” (analíticos).

“*Strapdown systems*” é o nome dado para um sistema integrado de medição inercial no qual três acelerômetros e três giroscópios são montados sobre eixos ortogonais coincidentes e sobre uma mesma base rígida (TITTERTON e WESTON, 1997). Os eixos dos acelerômetros e dos giroscópios devem ser coincidentes (paralelos) para que se possam realizar transformações de coordenadas. Esta tríade de sensores é então fixada numa aeronave e passa a formar o sistema de coordenadas da aeronave, denominado sistema móvel de coordenadas ou sistema de coordenadas “*roll, pitch, yaw*”. Quando um sistema de sensores inerciais “*strapdown*” é embarcado juntamente com um sistema de controle eletrônico dedicado, tem-se então uma estrutura denominada unidade de medição inercial, ou “*Inertial measurement unit*” – IMU.

As principais fontes de erros que degradam a precisão de um sistema de navegação inercial são erros de sensores ou distúrbios aleatórios. Muitas fontes de erros são de natureza aleatória e podem apenas ser descritas através da teoria de processos estocásticos (PAPOULIS, 1991). A seguir, são dadas as fontes de erros mais significativas que degradam o processo de navegação inercial “*strapdown*”.

- **Bias:** é um erro que pode ser interpretado como sendo um nível de sinal constante ou que varia muito lentamente, independentemente do sinal de entrada. Mesmo um sinal de bias constante pode mudar em algumas condições, por exemplo, ao se religar o equipamento.
- **Fator de escala:** trata-se de um erro que é proporcional ao sinal de entrada. Entretanto, erros deste tipo geralmente exibem algum grau de não linearidade.
- **Drift térmico:** os sensores são afetados pela temperatura e devem ser compensados eletronicamente. Como esta compensação nunca é perfeita, a deriva térmica (drift) deve ser modelada como um processo aleatório.
- **Erro de quantização:** os sinais de saída dos acelerômetros e giroscópios de uma IMU são obtidos em instantes discretos de tempo. Isto produz um ruído branco na saída que é proporcional à magnitude da quantização.
- **Desalinhamento:** refere-se ao desalinhamento mecânico entre eixos. Idealmente, os giroscópios e acelerômetros definem uma base ortogonal idealizada como estrutura da plataforma. Como é impossível se obter um perfeito alinhamento mecânico da plataforma na prática, descrevem-se então os erros de alinhamento de cada sensor, com relação aos eixos da plataforma como constantes aleatórias.

Os sistemas de coordenadas são utilizados para referenciar geograficamente um determinado corpo ou veículo. Portanto, para se definir a posição de um objeto, deve-se especificar o sistema de coordenadas no qual o objeto está inserido. Os sistemas de coordenadas utilizados em navegação inercial consistem de três eixos ortogonais entre si, sendo que os mais utilizados são (MOHINDER et al., 2001):

- Sistema “*Earth Centered Inertial*” – ECI, tem sua origem no centro de massa da Terra, sendo que seu eixo X aponta para o Sol passando pela linha do equador, o eixo Z passa pelo pólo norte e o eixo Y é orientado pelo resultado do produto vetorial dos outros

A figura 02 ilustra a relação entre os quatro sistemas de coordenadas. No globo terrestre, estão os sistemas: ECI, cujos eixos são designados pelo prefixo (i); o sistema ECEF, com eixos designados pelo prefixo (e); e o sistema NED ou sistema de navegação local, onde os eixos são designados pelas letras (N, E, D). O sistema RPY está fixo no corpo da aeronave que, por sua vez, se movimenta com o sistema de navegação local. O modelo terrestre adotado neste texto considera que a Terra é uma esfera perfeita de raio constante.

As transformações de coordenadas são utilizadas para converter um vetor representado num determinado sistema de coordenadas para um outro sistema de coordenadas conveniente. Para exemplificar, considere um vetor de acelerações tridimensional no sistema NED que é representado por:

$$a_{NED} = [a_N \quad a_E \quad a_D]^T \quad (2.3)$$

A matriz de transformação de coordenadas que leva o vetor de aceleração do sistema de coordenadas NED para o Sistema RPY é definida como:

$$C_{NED}^{RPY} \quad (2.4)$$

Assim, o novo vetor de acelerações no sistema RPY é dado por:

$$a_{RPY} = C_{NED}^{RPY} a_{NED} \quad (2.5)$$

Utilizando as matrizes de transformação de coordenadas conhecidas como “Ângulos de Euler”, determinou-se o vetor do sistema NED para RPY, do sistema RPY para NED e do sistema ECEF para NED (CHATFIELD, 1997).

$$C_{NED}^{RPY} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$C_{RYP}^{NED} = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

onde: ψ é o ângulo de rotação positivo sobre o eixo Z, θ é o ângulo de rotação positivo sobre o novo eixo Y e ϕ é o ângulo de rotação positivo sobre o eixo X resultante.

Por não serem perfeitos, os acelerômetros apresentam erros aleatórios que devem ser minimizados. Além destes erros, alguns fenômenos físicos devem ser

compensados, tais como a aceleração de Coriolis, a aceleração centrífuga e aceleração gravitacional. A aceleração de Coriolis é sentida por uma aeronave movendo-se em um referencial girante, e pode ser modelada por:

$$a_{Coriolis} = 2 \cdot \Omega \otimes v = 2 \cdot \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \Omega_3 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = 2 \cdot \begin{bmatrix} \Omega_2 \cdot v_3 - \Omega_3 \cdot v_2 \\ \Omega_3 \cdot v_1 - \Omega_1 \cdot v_3 \\ \Omega_1 \cdot v_2 - \Omega_2 \cdot v_1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

onde Ω é o vetor de rotação da Terra no sistema de coordenadas ECEF, dado por:

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,00007292 \end{bmatrix} rad/s \quad (2.9)$$

e \otimes é a notação utilizada para designar o produto vetorial. O vetor v deve ser calculado a cada iteração, integrando-se a aceleração estimada do veículo no sistema de coordenadas NED. Assim, para que os cálculos possam ser processados, torna-se necessário transformar o vetor Ω , que está no sistema ECEF, para o sistema NED, através da matriz de transformação:

$$C_{ECEF}^{NED} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & -\sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\lambda & \sin\lambda \\ 0 & -\sin\lambda & \cos\lambda \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

onde Φ é a latitude da aeronave e λ é a longitude. Assim pode-se calcular a aceleração de Coriolis a cada iteração e subtraí-la do vetor de acelerações medidas (saída dos acelerômetros). É necessário também fazer a correção da aceleração centrífuga, que é causada pela diferença de posição da aeronave e o eixo de rotação da Terra.

Esta aceleração é dada por:

$$a_{Centrifuga} = -\Omega \otimes (\Omega \otimes r_v) \quad (2.11)$$

onde o vetor Ω é o vetor de rotação da Terra e r_v é a posição do veículo, ambos no sistema ECEF. A posição do veículo pode ser calculada por:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \cos\lambda \cos\phi \\ -R \sin\lambda \cos\phi \\ -R \sin\lambda \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

onde R é a distância entre o centro de massa da Terra e o centro de massa da aeronave, e equivale aproximadamente ao raio da Terra. Desta forma, pode-se calcular a aceleração centrífuga no sistema de coordenadas ECEF e posteriormente converter esta aceleração obtida para o sistema NED. Finalmente, subtrai-se o vetor de aceleração centrífuga obtido e transformado para o sistema NED, do vetor de acelerações medidas pelos acelerômetros (também no sistema NED). Por fim, a gravidade terrestre também deve ser compensada, pois os acelerômetros medem a chamada aceleração específica, que é a soma da aceleração do corpo e a componente gravitacional g . A aceleração gravitacional experimentada por um corpo na superfície terrestre é dada por:

$$g = \frac{GM_T}{R^2} \approx 9,80665 \text{ m/s}^2 \quad (2.13)$$

onde G é a constante gravitacional universal, M_T é a massa da Terra e R é a distancia entre o centro da terra até o centro de massa da aeronave. No sistema de coordenadas NED, o vetor de aceleração gravitacional é dado por:

$$g = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 9,80665 \end{bmatrix} \text{ m/s}^2 \quad (2.14)$$

dado que a unidade de medição inercial registra a aceleração gravitacional como $-g$, este vetor de aceleração gravitacional deve ser somado ao vetor de acelerações medidas (sistema NED). Assim, o modelo final para se fazer as correções determinísticas do vetor de acelerações medidas torna-se então:

$$a_{Veículo} = C_{RYP}^{NED} \cdot a_{medida} - \left(C_{NED}^{ECEF} \cdot 2 \cdot \Omega \right) \otimes v + g - C_{NED}^{ECEF} \cdot \left(\Omega \otimes \left(\Omega \otimes r_v \right) \right) \quad (2.15)$$

esta equação é conhecida como “equação universal da navegação inercial”.

Para estimar a posição da aeronave a partir dos dados fornecidos pela IMU, será descrito o modelo no espaço de estado discreto. O modelo do sistema no espaço de estado discreto é descrito por:

$$X_{k-1} = AX_k + BU_k + CW_k \quad (2.16)$$

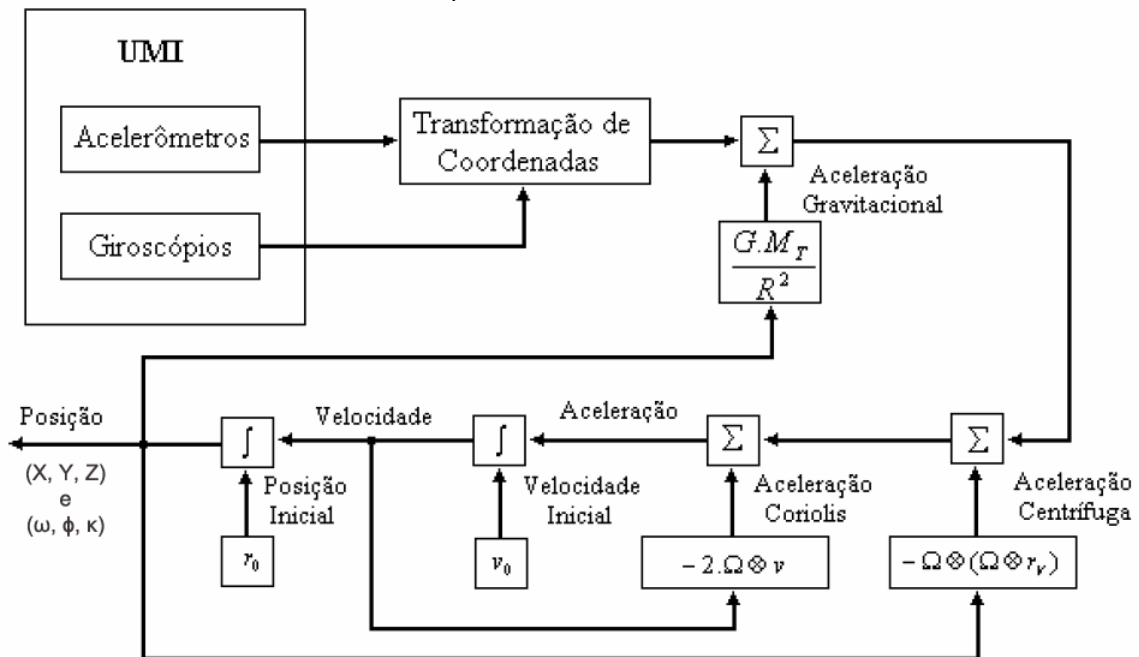
$$Y_k = HX_k + GE_k \quad (2.17)$$

Nestas equações, x_k , é o vetor de estados, u_k é o vetor de entradas, y_k é o vetor de medidas de referência (ou saídas), w_k é um vetor de ruídos aleatórios e e_k é

um vetor de erros de medição. As matrizes A, B e C são matrizes que definem a dinâmica do processo, enquanto que G e H são matrizes que definem a equação de medição. Os elementos diagonais das matrizes C e G, que modelam os erros e ruídos, devem ser escolhidos, convenientemente, de acordo com a aplicação. Para o exemplo a seguir, adota-se uma matriz de ruídos $C=I_{9 \times 9}$ e uma matriz de erro $G=I_{3 \times 3}$.

A figura 03 mostra o esquema matemático geral de uma Unidade de Medida Inercial para estimar posições a partir de uma central inercial “strapdown”.

FIGURA 03 – Esquema da Unidade de Medida Inercial



FONTE: Santana et al., 2004.

Serão utilizadas as leis do movimento de Newton para se obter a posição a partir da aceleração, onde a equação da posição é dada por:

$$p_t = p_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (2.18)$$

Fazendo-se o período de amostragem igual a T, e admitindo que T é muito pequeno, tem-se a equação discreta da posição:

$$p_{k-1} = p_k + v_k T + \frac{1}{2} a_k T^2 \quad (2.19)$$

O vetor a_k contém as acelerações fornecidas pela IMU nas direções x, y e z, já transformadas para o sistema NED, assim a_k será o vetor de entradas. As

acelerações obtidas através do IMU possuem erros de medidas e portanto será considerado o seguinte modelo para descrever o vetor de aceleração real:

$$a_{real,k} = a_k + \delta a_k \quad (2.20)$$

onde, a_k é a aceleração medida e δa_k é o erro de medição. Como o erro de medição é uma variável a ser estimada, o mesmo fará parte do vetor de estados. Assim o nosso modelo é descrito por:

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ y_{k+1} \\ z_{k+1} \\ vx_{k+1} \\ vy_{k+1} \\ vz_{k+1} \\ \delta ax_{k+1} \\ \delta ay_{k+1} \\ \delta az_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 & 0,5T^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 & 0,5T^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 & 0,5T^2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \\ vx_k \\ vy_k \\ vz_k \\ \delta ax_k \\ \delta ay_k \\ \delta az_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,5T^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5T^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5T^2 \\ T & 0 & 0 \\ 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & T \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ax_k \\ ay_k \\ az_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_k^1 \\ W_k^2 \\ W_k^3 \\ W_k^4 \\ W_k^5 \\ W_k^6 \\ W_k^7 \\ W_k^8 \\ W_k^9 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

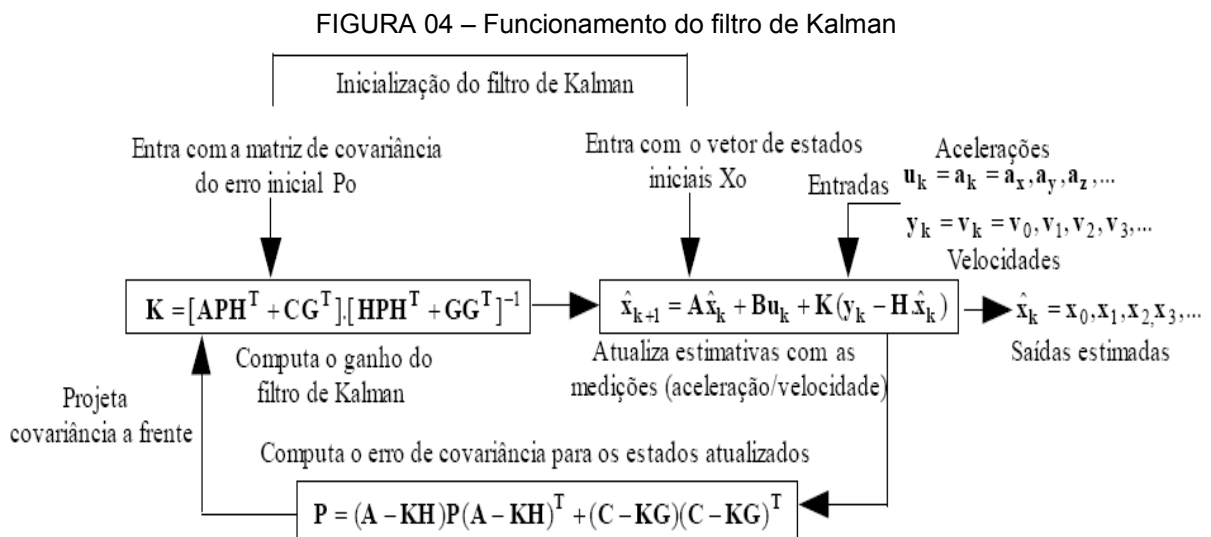
Neste modelo, o vetor de estados é formado por nove elementos: x , y e z são as três coordenadas de posição, v_x , v_y e v_z são as três componentes da velocidade e δax , δay e δaz são as componentes do erro de aceleração. O vetor de entradas é formado por três elementos que são as componentes da aceleração fornecidas pela IMU. Neste vetor já devem estar feitas as correções determinísticas e a transformação para o sistema NED. O vetor w , composto por nove elementos independentes, é um vetor de ruídos aleatórios ao processo. T é o período de amostragem utilizado entre duas medições consecutivas.

Uma simulação simples do sistema irá gerar erros de posição elevados, após poucos minutos, e isso se deve à presença dos ruídos aleatórios nas medidas fornecidas pelos acelerômetros e giroscópios da UMI. Como este ruído não é determinístico, a forma mais adequada de minimizar seus efeitos é através do Filtro de Kalman (BROWN et al., 1997) e (ROGERS, 2000). Para utilizar esse filtro, deve-se obter uma referência do vetor de estados (que pode ser a posição fornecida por um odômetro ou a velocidade fornecida por um velocímetro). É importante que o ruído do processo w não tenha o mesmo perfil do ruído de referência e, no caso de ambos possuírem o mesmo perfil o Filtro de Kalman não irá funcionar adequadamente. Como o ruído do UMI é um ruído cumulativo e os ruídos do

odômetro e do velocímetro não o são, o Filtro de Kalman consegue combinar satisfatoriamente estas características de forma a estimar a posição da aeronave com erros relativamente pequenos. A seguir, é apresentado o modelo de medição de referências, onde x é um vetor de erros de medidas e y é o vetor de medidas de referência (no caso, velocidades nas três direções).

$$\begin{bmatrix} y_k^1 \\ y_k^2 \\ y_k^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \\ vx_k \\ vy_k \\ vz_k \\ \delta ax_k \\ \delta ay_k \\ \delta az_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_k^1 \\ e_k^2 \\ e_k^3 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

A figura 04 mostra um diagrama de implementação do filtro de Kalman para se obter as estimativas de estados do sistema, a partir do vetor de medidas de aceleração a_k , fornecidas pelos acelerômetros do UMI e do vetor de saídas v_k fornecido pelo velocímetro.



FONTE: Santana et al., 2004.

Antes de se iniciar os cálculos para se obter a posição instantânea da plataforma, é necessário efetuar um alinhamento inicial do sistema, no qual se deve

estabelecer a atitude inicial da plataforma com relação ao sistema de referência desejado. O alinhamento inicial pode ser feito de muitas formas, sendo que a mais simples é a utilização de uma técnica conhecida por “*girocompassing*” que utiliza os acelerômetros do IMU para efetuar o nivelamento e os giroscópios para determinar o norte geográfico. O nivelamento é obtido inclinando-se a plataforma até que apenas o acelerômetro do eixo Z apresente leitura igual à aceleração gravitacional ($-g$). Para determinação do norte geográfico, rotaciona-se o IMU em torno do eixo Z até que o giroscópio do eixo X apresente leitura nula e o giroscópio do eixo Y apresente a velocidade de rotação da Terra (Ω). A técnica de “*girocompassing*” não pode ser aplicada em UMI que possua giroscópio com erros superiores a $15,04^\circ/\text{h}$, devido à impossibilidade de se medir a velocidade de rotação da Terra (SANTANA et al., 2004).

2.1.3.2.3 Sistema de Navegação Inercial – SNI

Nas secções anteriores os erros e as características do GPS e do UMI foram descritos, bem como os seus comportamentos. A integração dos dois sistemas irá melhorar significativamente a precisão e confiabilidade do GNSS / UMI, se levado em conta a comparação com as unidades individualmente. Assim, esta integração a cada ano que passa vem melhorando e trazendo ganhos significativos para os levantamentos apoiados por sistemas de navegação inercial – SNI. Os seus benefícios são muito evidentes: a alta estabilidade do UMI em pequenos intervalos é utilizada para facilitar a observação dos ruídos do GNSS. A previsão do UMI da posição e velocidade ajuda o receptor GNSS a detectar os ciclos da fase e minimiza as perdas de sinais do satélite. Por outro lado, o GNSS exibe a alta estabilidade a longo prazo e, portanto, as suas observações são adequadas para compensar os erros sistemáticos do UMI.

Basicamente, a integração é possível em diferentes níveis de hardware e de software. A integração de hardware ocorre quando os componentes dos sistemas são combinados fisicamente e não será tratada nesta pesquisa. Esta abordagem oferece vantagens como, por exemplo, na reaquisição dos sinais de satélite após

uma perda de sinal, porém uma vez implementada esta combinação para um determinado levantamento, fica difícil utilizar este mesmo sistema integrado em outros levantamentos. Portanto, utilizar unidades de hardware independentes, ou seja, uma para o GNSS e outra para o UMI, e combinando os resultados na saída de ambos os sistemas através de software é mais comum e possibilita mais aplicações. Esta combinação pode ser dividida em uma abordagem centralizada e descentralizada de filtragem.

No primeiro tipo de combinação, GNSS e o UMI estão ligados por conjunto de filtros. A integração é feita sobre a medição bruta dos dados de ambos os sub-sistemas, ou seja, na posição e na velocidade. Em geral, esta abordagem centralizada parte do processamento dos dados GNSS que podem ser utilizados para atualização, porém não é suficientemente flexível para a combinação com outros sensores, porque o filtro principal necessita ser recalculado para adicionar um novo sensor.

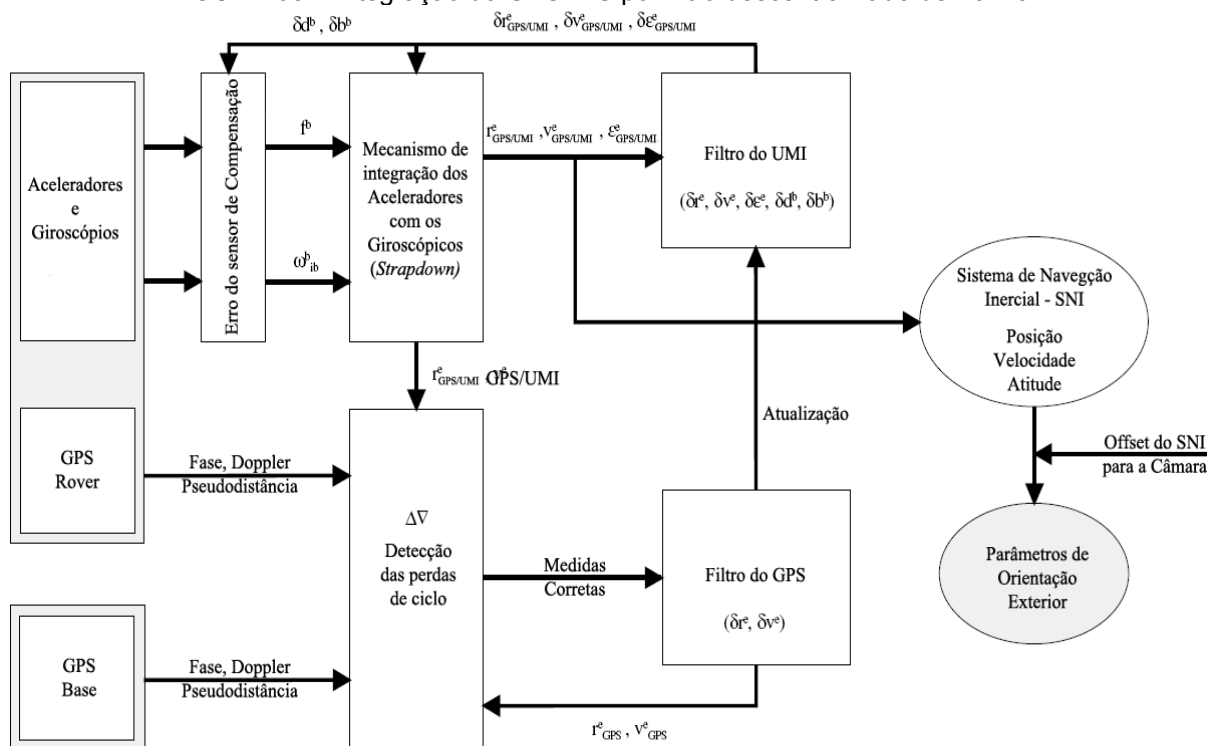
Para resolver este problema, uma abordagem descentralizada pode ser escolhida. Ao contrário dos dados serem centralizados nos sub-sistemas, os resultados são alimentados diretamente no filtro principal. Esta integração proporciona grande flexibilidade para adicionar outros sensores sem modificar todo o filtro principal, e é mais confiável uma vez que os diferentes erros dos sub-sistemas podem ser detectados antes dos dados serem combinados no filtro principal.

Na maioria das vezes, os filtros são executados separadamente. No entanto, periodicamente a saída de um filtro é utilizada como pseudo-medida para atualizar o outro filtro. Dependendo das diferentes formas como os filtros se integram, é possível gerar diferentes projetos para a abordagem descentralizada. Eles são chamados de filtros descentralizados complementares, sub-descentralizada ou ainda cascata filtro. Para mais informações sobre estes tipos de filtros e a correta formulação matemática das equações de filtragem Kalman, ver em Wei e Schwarz (1990), Škaloud (1995), Gelb (1974).

Toda a complexidade de integração GNSS/UMI no filtro de Kalman descentralizado é apresentada na figura 05 (ŠKALoud, 1996). Nesta figura, estão trabalhando em paralelo dois filtros: um filtro para o processamento local de dados do GNSS e outro para os dados do UMI. No vetor GNSS, estão a dupla diferença de

fase e as observações, onde estes constituem o filtro principal. No vetor deste filtro, estão os seis erros padrões, sendo três de posição δr_x^e , δr_y^e , δr_z^e e três de velocidade δv_x^e , δv_y^e , δv_z^e . A estimativa de posição e velocidade do GNSS é utilizada como pseudo-medida para a atualização do filtro principal do UMI. O vetor deste filtro principal é constituído por quinze erros padrões: nove erros de navegação, sendo três de posição δr_x^e , δr_y^e , δr_z^e , três de velocidade δv_x^e , δv_y^e , δv_z^e , e três de desalinhamento $\delta \epsilon_x^e$, $\delta \epsilon_y^e$, $\delta \epsilon_z^e$, e seis que descrevem as condições do erro sistemático do sensor UMI. Estes erros são dados no próprio corpo do UMI e são a inclinação do acelerômetro δb_x^b , δb_y^b , δb_z^b e a deriva do giroscópio δd_x^d , δd_y^d , δd_z^d . A atualização do erro padrão do UMI são alimentados de volta para corrigir o UMI das medições brutas e para auxiliar o “*strapdown*” do UMI. Assim, os dados de saída do mecanismo não se originam somente a partir do UMI, mas da integração do GNSS / UMI. As informações de posição e de velocidade são utilizadas para detectar e corrigir possíveis perdas de ciclo nas observações do GNSS. Após aplicadas as correções dos termos espaciais e compensada a rotação constante, como descrito anteriormente, os parâmetros de orientação exterior são obtidos (CRAMER, 1997).

FIGURA 05 – Integração do GPS/INS por filtro descentralizado de Kalman.



FONTE: Cramer, 1997.

2.1.4 Ortofoto Digital

A “ortofoto” ou ortofotografia é a fotografia resultante da transformação de uma foto original, que é uma perspectiva central do terreno, em projeção ortogonal sobre um plano. Desta maneira, os objetos ou pormenores, nela contidos são apresentados em suas verdadeiras posições ortográficas (ANDRADE, 1977).

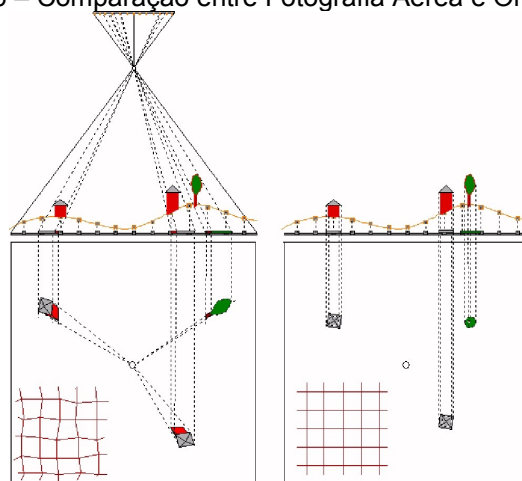
A ortofoto possui a congruência geométrica de um mapa, o qual representa a projeção ortogonal da superfície da terra e o termo “Digital” da ortofoto tem um sentido mais específico: refere-se ao processamento da imagem e aos procedimentos de digitalização matricial de imagens (BÄHR et al., 1991).

Uma vez que a fotografia é transformada em modo “raster”, os pontos fundamentais deste produto são: o modelo geométrico e os parâmetros de transformação que definem atributos para os dados da imagem, tornando-os georeferenciados ou “geocodificados” (SATO, 1996).

As vantagens deste produto podem ser percebidas na melhoria de qualidade dos resultados, bem como na flexibilidade de processamento dos dados. Isso conduz finalmente à integração das ortofotos digitais nos sistemas de informações geográficas e à extração de objetos automaticamente referentes à topologia e à semântica.

A Figura 06 mostra a projeção central da fotografia e a projeção ortogonal de uma ortofoto.

FIGURA 06 – Comparação entre Fotografia Aérea e Ortofoto Digital



FONTE: Araki, 2005.

Claramente, a ortofoto digital, é uma base ideal para a atualização de mapas de linhas existentes, exibindo dados vetoriais do mapeamento antigo sobre uma nova imagem (BONIFACE, 1992).

De maneira geral, a ortofoto é uma fotografia ou uma imagem que quando apresentada na forma digital, representa as feições projetadas ortogonalmente, com uma escala constante, corrigida do deslocamento devido ao relevo e da inclinação da câmara. Por isso, ela se torna geometricamente equivalente a uma carta. Desta forma, podem ser realizadas medidas semelhantes às que são feitas sobre um mapa (SANTOS, 2000).

Logo, dispondo do modelo de terreno e da orientação exterior da câmara, faz-se a relação entre as coordenadas (X,Y,Z) do espaço objeto e as coordenadas fotogramétricas (x',y') por meio das equações de colinearidade (ARAKI, 2005).

Resumidamente, o processo de ortorretificação consiste nos seguintes passos: obtenção da posição XYZ de um ponto, utilizando o modelo digital de terreno; o cálculo da posição correspondente a este ponto na fotografia por meio das equações de colinearidade; a interpolação para obter o valor do pixel a ser levado para a ortofoto; e a transferência do valor do pixel interpolado para a posição correspondente à posição (X,Y) na ortofoto.

A ortofoto digital tem grande importância como mapa e imagem. Como mapa, possui distorção mínima de escala. Como imagem, além de não requerer alguns níveis de detalhes para retratar as feições planimétricas do terreno, possui a mesma qualidade geométrica dos mapas. A geração da ortofoto digital proporciona a diminuição de tempo e esforço do operador, comparado ao processo convencional de restituição. Com o advento dos sistemas fotogramétricos digitais, bem como o baixo custo dos seus produtos, está ocorrendo a integração de técnicas de mapeamento digital e sistemas de informação geográfica, que tem colaborado muito para o aumento da demanda de ortofotos digitais (BRITO, 1997).

Em função dessas características, a ortofoto digital é de grande utilidade em aplicações tais como: projetos de oleodutos, estradas, irrigação, cadastro urbano, atualização cartográfica, avaliação de imóveis, controle de qualidade, dentre outros" (SANTOS, 2000).

2.2 SISTEMA LASER SCANNER AEROTRANSPORTADO – SLSA

2.2.1 Considerações Gerais

Os termos LiDAR e “altimetria laser” têm atualmente o mesmo significado, embora originalmente fossem considerados distintos (DUBAYAH, 2000). Este mesmo autor afirma, ainda, que existe um senso comum crescente no sentido de rotular todas as observações laser da superfície terrestre como altimetria laser “*laser altimetry*” e todas as observações laser da atmosfera terrestre como LiDAR.

Ackermann (1999), Baltsavias (1999) e Wehr (1999), associam o termo varredura laser ou “*laser scanning*” ao instrumento ou sistema, fazendo a distinção entre os utilizados em levantamentos terrestres (posicionados sobre a superfície do terreno em plataformas fixas ou móveis), os utilizados em levantamentos aéreos (a bordo de aeronaves) e os utilizados em levantamentos espaciais (a bordo de espaçonaves ou satélites artificiais).

As técnicas de perfilamento, como as de varredura (terrestre e aérea) anteriormente mencionadas, estão compreendidas pela tecnologia LiDAR (JONAS et al., 2003). Este mesmo autor afirma, ainda, que os norte-americanos preferem o emprego do termo LiDAR ao termo “*Aiborne Laser Scanning*” – ALS, usualmente empregado em outras partes do mundo.

Considerando o exposto, o Sistema Laser Scanner Aerotransportado – SLSA conhecido mundialmente como “*Light Detection and Ranging*” – LiDAR, apresenta-se para o mercado mundial como uma nova concepção de produção cartográfica. Seu emprego, para fins de mapeamento, possui várias terminologias, tais como:

- a) Sistema Laser Scanner Aerotransportado;
- b) Perfilamento a Laser;
- c) Mapeamento a Laser;
- d) Altimetria a Laser;
- e) Sistema Aerotransportado a Laser para Mapeamento.

A fim de evitar confusão com a terminologia, ao longo da pesquisa, sempre que houver uma referência à tecnologia Sistema Laser Scanner Aerotransportado, o termo “SLSA” será utilizado.

O SLSA é um sistema de sensoriamento remoto ativo aerotransportado usado para modelar a superfície terrestre, levantando pontos tridimensionais sobre a superfície do terreno, bem como os objetos (vegetação e construções) nela contida. Para levantar os pontos tridimensionais sobre a superfície do terreno, o SLSA utiliza o princípio da velocidade da luz para medir a distância entre o Sensor Laser e a Superfície Terrestre (SLOBODA, 2005).

O desenvolvimento da tecnologia SLSA deu-se a partir da necessidade de usuários obterem informações tridimensionais da superfície do terreno, ou seja, Modelo Digital do Terreno (MDT) e Modelo Digital de Elevação (MDE).

Existem três tipos de SLSA no mercado (BRANDALIZE, 2004):

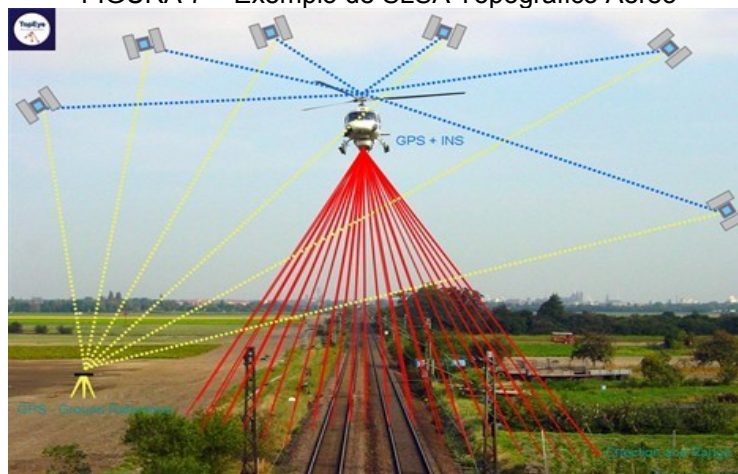
- a) SLSA topográfico: utilizado na determinação das coordenadas tridimensionais absolutas de pontos e/ou objetos situados sobre a superfície do terreno;
- b) SLSA batimétrico: determina a profundidade de corpos d'água (como rios, mares e oceanos);
- c) SLSA atmosférico: utilizado na determinação da velocidade dos componentes da atmosfera terrestre (gases, vapor d'água, partículas em suspensão) e a velocidade dos ventos.

A tecnologia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa foi realizada no SLSA Topográfico, a qual ainda se apresenta para o mercado mundial como uma nova concepção de produção de cartografia.

O SLSA topográfico (ver figura 7) é um sistema ativo que opera radiação laser pulsada com comprimentos de onda únicos (normalmente na faixa do infravermelho), em direção à superfície do terreno, e tem por objetivo a determinação das elevações desta superfície. É normalmente utilizado em plataformas aéreas (avião ou helicóptero), embora também possa ser utilizado em plataformas terrestres e espaciais (LILLESAND et al., 2000).

Por volta de 1993, pesquisadores da “*Deutsche Forschungsgemeinschaft*” (Alemanha) deram início às experiências com o Laser Scanner Aerotransportado, levando à criação da TopScan GmbH. Mais tarde, em conjunto com a empresa Optech Inc. (Canadá), a TopScan GmbH obteve o primeiro projeto demonstrativo da técnica de SLSA (WEVER et al., 1999).

FIGURA 7 – Exemplo de SLSA Topográfico Aéreo



FONTE: Topoeye AB, 2009.

Em meados da década de 90, havia apenas uma empresa comercializando e desenvolvendo o SLSA. Já as empresas e os institutos de pesquisa especializados na utilização de dados laser eram poucos. Já no último levantamento de mercado realizados no ano 2000, constataram-se mais de cinco fabricantes que produzem sistemas completos ou componentes para o sistema.

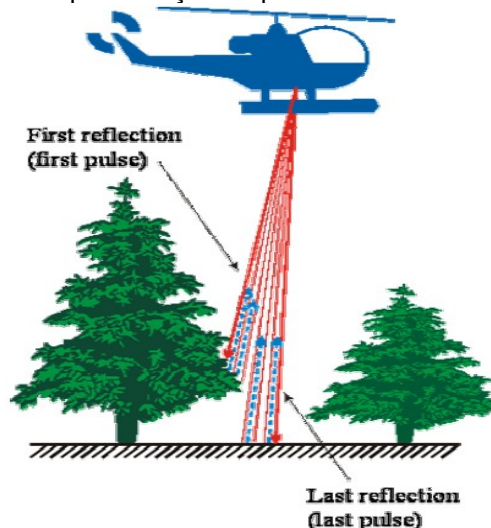
Nos últimos dez anos, o interesse em SLSA tem crescido enormemente, podendo-se dizer que esta tecnologia está passando agora para a sua maturidade, devendo apresentar grandes e importantes evoluções (MACHADO, 2006).

2.2.2 Princípio de Funcionamento

Seu princípio de funcionamento está baseado na emissão de feixe laser infravermelho que é disparado em direção à superfície terrestre. Na superfície, estes feixes são refletidos por obstáculos (construções, vegetação ou o próprio terreno) e são captados pelo sensor. Para cada feixe emitido, é registrado o tempo de percurso aeronave – obstáculo – aeronave. A partir do tempo de percurso do laser, é possível determinar a distância. A atitude e a posição da aeronave é constantemente registrada pelo SNI e esses dados também são levados em conta para produzir uma posição tridimensional do ponto da superfície da Terra que foi atingido por cada pulso laser.

Como a área de cobertura de cada feixe é variável de acordo com a altitude, é possível que uma porção do mesmo feixe laser encontre um ou mais objetos antes de atingir o solo (ver a figura 8). Esses encontros geram um retorno parcial do feixe denominado de primeiro retorno. O laser scanner armazena dados tanto do primeiro retorno como também do último retorno de maneira geral. De posse desses dois tipos de informações, é possível gerar modelos digitais da superfície terrestre a partir de ambos os retornos, ou seja, Modelo Digital de Elevação – MDE. Através de filtros matemáticos aplicados no MDE, pode-se gerar o Modelo Digital de Terreno – MDT.

FIGURA 8 – Representação do primeiro e do último pulso laser

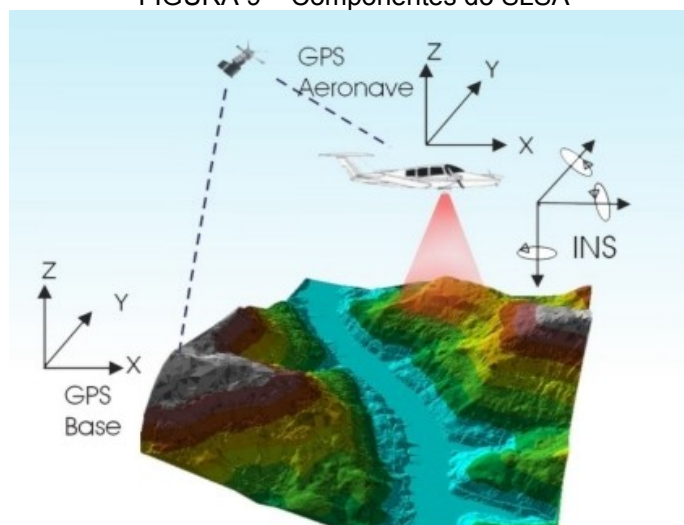


FONTE: Opten, 2004.

2.2.3. Componentes Básicos

Os componentes básicos do SLAS são os seguintes: Sensor Laser (figura 11), composto pela fonte do pulso LASER, sistema óptico de transmissão e recepção do pulso laser; Sistema de Navegação Inercial – SNI; Receptor GNSS; Computadores de bordo (figura 10) com programas para gerenciamento de todo o sistema; Unidade de armazenamento dos dados brutos provenientes do GNSS, do SNI e das medições laser (tempos e ângulos), sendo necessário também um receptor GNSS de base, para que os dados do laser sejam pós-processados e corrigidos em relação ao referencial adotado para o mapeamento (ver figura 9).

FIGURA 9 – Componentes do SLSA



Cabe ressaltar que a quantidade de bases GNSS instaladas no mapeamento é característica da extensão e da forma da superfície que está sendo levantada, sendo, às vezes, necessário mais de uma estação GNSS de base.

Além dos componentes básicos de voo e campo, são necessários programas de processamento para completar a solução do SLSA, entre os quais estão os programas para descarga dos dados brutos, os programas de pós-processamento dos dados GNSS, ou seja, a trajetória da aeronave, e os programas de processamento dos dados laser. Os componentes básicos apresentados nesta pesquisa são específicos do sistema desenvolvido pela empresa canadense Optech Inc.

FIGURA 10 – Computador de Controle



FIGURA 11 – Sensor Laser



2.2.4. Produtos Gerados

A partir do processamento dos dados brutos adquiridos em voo e em campo, através do GNSS da aeronave, SNI da aeronave, medidas do laser (tempo e ângulos) e GNSS de campo (base de referência), é possível gerar a nuvem de pontos tridimensionais (X, Y, Z) georreferenciados no Sistema Geodésico Brasileiro.

A partir da nuvem de pontos tridimensionais, gerada pelo SLISA, é possível classificá-la nos seguintes produtos: nuvem de pontos de elevação, que após o processamento matemático será gerado o Modelo Digital de Elevação – MDE (ver figura 14); nuvem de pontos de terreno, que após o processamento matemático será gerado o Modelo Digital do Terreno – MDT (ver figura 15), além da geração das imagens de intensidade e hipsometria com a nuvem de pontos de elevação (Jardim Botânico, Curitiba – PR), ver figuras 12 e 13.

FIGURA 12 – Imagem de Intensidade

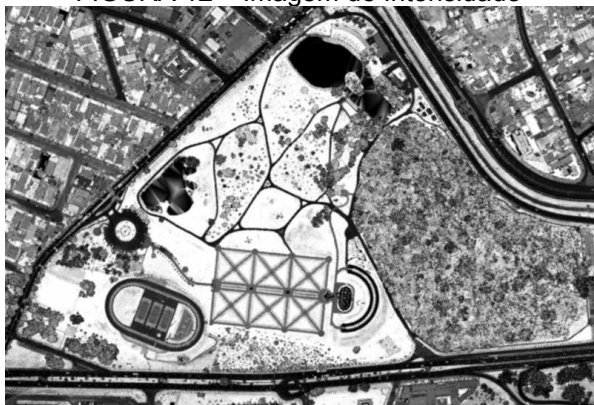
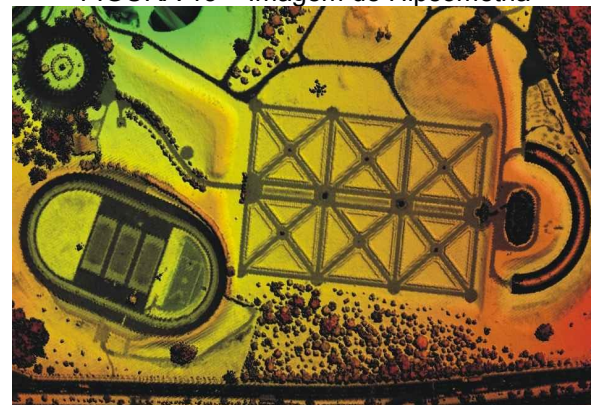


FIGURA 13 – Imagem de Hipsometria



Tanto o MDT com o MDE normalmente é uma malha triangular, composta por um conjunto de superfícies, onde cada superfície é um plano determinado por três pontos, onde o domínio de cada superfície é uma região definida pela projeção no plano xy, dos três pontos da superfície. O processo para obtenção de um MDT ou MDE, passa por três etapas: (a) obtenção de uma nuvem de pontos xyz do terreno; (b) decomposição da projeção da superfície do terreno em triângulos no plano xy em função das amostras; (c) ajusta-se um plano em cada triângulo com as informações dos três vértices, sendo o domínio de cada equação do plano restrito ao triângulo, o que significa aproximar o terreno por uma superfície poliédrica. Como cada uma das

faces planares da superfície a ser obtida fica completamente caracterizada a partir de três de seus pontos.

O MDT trata dos pontos que representam o terreno, enquanto o MDE trata dos pontos que representam as elevações contidas na superfície (TOMASELLI et al., 2000).

FIGURA 14 – Modelo Digital de Elevação (MDE)

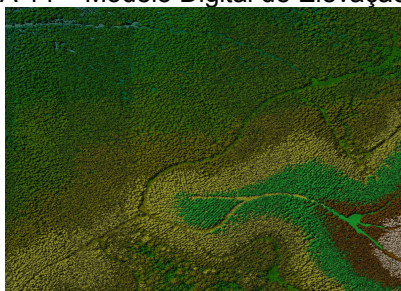
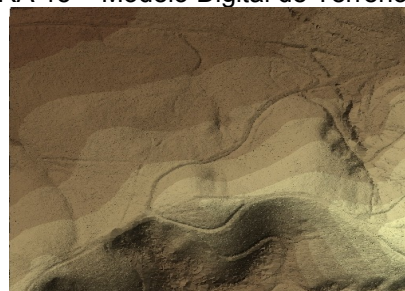


FIGURA 15 – Modelo Digital de Terreno (MDT)



A partir do MDE e MDT, proveniente da nuvem de pontos do SLA, é possível confeccionar produtos cartográficos, como exemplo, mapeamento planialtimétrico, mapeamento altimétrico, mapeamentos de áreas de enchente, declividade do terreno, drenagem do terreno, mapeamento temático de áreas de desmatamento, mapas de intensidade e hipsometria, mapas volumétricos da vegetação ou do terreno, base de dados espaciais para Sistema de Informação Geográfica – SIG; além de produzir dados para gerar seções transversais (MARTINS et al., 2004).

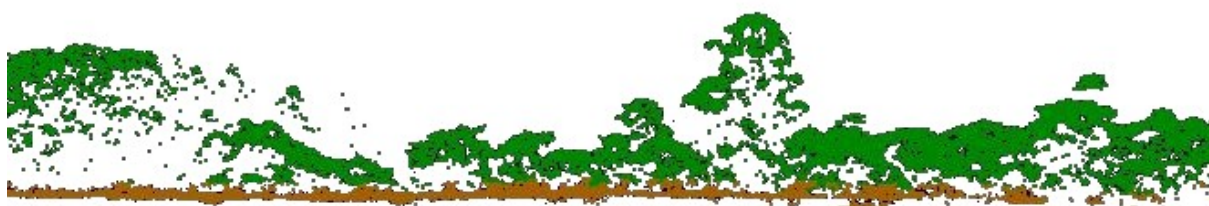
2.2.5 Aplicações dos Dados

Existem várias aplicações na cartografia que requerem medidas tridimensionais de objetos da superfície terrestre e que necessitam atender requisitos de rapidez e exatidão, tais como:

1. Na área de telecomunicações, onde os Modelos Digitais de Elevação – MDE permitem estudos de propagação de ondas e posicionamento de antenas receptoras e transmissoras;

2. Na área de geologia, para o cálculo de volumes escavados, cálculo de massa florestal, volumes deslocados e modelagem de grandes estruturas artificiais;
3. Em obras viárias (rodovias e ferrovias), para projeto ou para detecção rápida de interferências na faixa de domínio, cálculo de volumes de corte e aterro
4. Na engenharia florestal, para determinação de volume e altura de vegetação, estimativa de biomassa, além de remoção virtual de cobertura vegetal (ver figura 16);

FIGURA 16 – Perfil do Nuvem de Pontos Tridimensional da Mata Atlântica



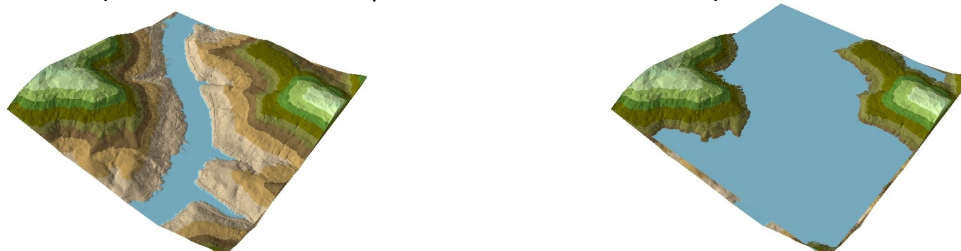
5. Nos modelos tridimensionais urbanos, para cálculos de volume de feições artificiais, corredores formados por edifícios em vias preferenciais, estudos de micro clima, propagação de ruídos, controle de inundação, drenagem, saneamento e poluentes (ver figura 17);

FIGURA 17 – Modelo Tridimensional Urbano



6. Estudos específicos de corredores, como dutos, linhas de transmissão possibilitando a obtenção de perfis com boa qualidade;
7. Na área de mapeamento cartográfico, como base de dados para áreas rurais e urbanas para utilização no sistema de informações geográficas – SIG;
8. Na área de modelos tridimensionais aplicadas em cálculos de carga hidráulica de barragens em épocas de cheia ou baixa de reservatórios, rompimento de barragem, controle de inundações, modelagem de bacias hidrográficas, drenagem, e monitoramento de erosão, conforme figura 18 e 19;

FIGURA 18 – Mapas de Enchente, Tempo Inicial FIGURA 19 – Mapas de Enchente, Tempo Final



9. Recapacitação das linhas de transmissão, para localização de interferência de árvores e outras estruturas na faixa de domínio, posicionamento de torres e modelagem de catenária de cabos (talvez a mais distinta aplicação, pois a identificação de pequenos objetos como cabos é muito mais difícil na fotografia aérea), figura 20;

FIGURA 20 – Secção Transversal da Linha de Transmissão



2.2.6 Fabricantes

Segundo FLOOD (2003), os fabricantes dos sistemas de LSA são:

- I. LEICA GEOSYSTEMS (1998 – Suíça): com os modelos ALS50, ALS50-II ALS60 e ALS Corridor Mapper;
- II. TOPOSYS GMBH (1995 – Alemanha): com os modelos Falcon II, Falcon III, Harrier 56 e Harrier 24;
- III. OPTECH INC. (1995 – Canadá): com os modelos ALTM 1210, ALTM 1233, ALTM 2025, ALTM 3100, ALTM 3100EA, ALTM Gemini, ALTM Orion (Corridor mapping) e ALTM Pegasus;
- IV. RIEGL LASER MEASUREMENT SYSTEMS (1978 – Áustria): com os modelos LMS-Q680i, LMS-Q560, LMS-Q240i, LMS-Q160.

2.2.7 Comparação do SLSA x Fotogrametria

A Fotogrametria e o SLSA têm como principal objetivo coletar coordenadas tridimensionais de pontos remotos sem tocá-los. A análise a seguir demonstra a capacidade das duas técnicas em levantar uma nuvem de pontos tridimensionais da superfície terrestre, apontando a vantagem de uma em relação à outra, conforme apresentado na tabela 01.

TABELA 01 – Comparação do Laser Scanner x Fotogrametria

CARACTERÍSTICAS	LASER SCANNER	Fotogrametria
Sensor	Sistema ativo Sensor pontual	Sistema passivo Sensor linear e quadro
Dados	Aquisição direta de coordenadas (x,y,z), coletado digitalmente e processada automaticamente	Aquisição da informação de forma indireta
Altitude de voo	Baixa (até 5 km)	Baixa (até 5 km) e Média (5 a 10 km)
Obstáculos	- Condições climáticas: Nuvens baixas, chuva, névoa.	- Condições climáticas: Nuvens em geral, chuva, névoa; - Inclinação do Sol; - Uso noturno.
Problemas	Provoca áreas de sombras devido à inclinação do sinal emitido	Provoca áreas de sombras na presença de declividades intensas

FONTE: Baltsavias, 1999.

Outras tabelas comparativas podem ser vistas em Machado 2006, ver nas tabelas 02 e 03.

TABELA 02 – Vantagens do SLSA sobre a Fotogrametria

SLSA	FOTOGAMETRIA
Alta densidade de informação em superfície homogênea	Baixa densidade de informação em superfície homogênea
Levantamento de dados durante o dia e a noite	Levantamento de dados durante o dia
Determinação direta de coordenadas 3D	Onerosos procedimentos para determinação de coordenadas 3D
Qualidade na acurácia vertical	Menor qualidade na acurácia vertical

FONTE: Machado, 2006

TABELA 03 – Vantagens da Fotogrametria sobre o SLSA

FOTOGAMETRIA	SLSA
Alta redundância	Baixa redundância
Rica em informações semânticas	Dificuldade de extração de informações semânticas
Determinação de Breaklines	Dificuldade de determinação de Breaklines
Qualidade da acurácia horizontal	Menor qualidade da acurácia horizontal

FONTE: Machado, 2006.

2.3 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO AEROLEVANTAMENTO

2.3.1 Etapa Aérea

Os parâmetros de configuração da fase aérea de aquisição de dados do SLSA e imagens digitais aéreas terão as especificações (OPTECH, 2002):

1. Altura de voo entre 600m a 2.000m. A altura de voo é definida conforme a precisão requirida para o levantamento, por exemplo: para o um voo a 1.000m de altura a precisão é de 50cm na planimetria e de 15cm na altimetria, já para um voo a 2.000m a precisão é de 100cm na planimetria e 25cm na altimetria;

2. As condições de *Global Navigation Satellite System* – GNSS para realizar o levantamento SLISA devem ser as seguintes: Número mínimo de satélites 5 e *Position Dilution of Precision* – PDOP inferior a 4 para que as precisões acima citadas sejam atendidas;
3. Exigência do certificado de calibração do equipamento laser, como no máximo 6 meses de execução para garantir as precisões acima citadas;
4. O ângulo de varredura é variável de 0° a 40°. Quanto mais aberto o ângulo for mais larga é a faixa do levantamento (ver equação 2.23).

$$Largura\ da\ faixa = \left(\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right) \cdot alt_{voo} \cdot 2 \quad (2.23)$$

Sendo:

α = Ângulo de Varredura

Alt_{voo} = Altura de voo

Porém, deve-se tomar alguns cuidados na determinação do ângulo de varredura, pois quando se utiliza um ângulo aberto 40° em áreas urbanas poderá haver oclusões de certas regiões, ou seja, áreas sem informações. Para um levantamento realizado em cidades onde há edifícios altos, aconselha-se utilizar um ângulo de varredura de até 20°. Ver equação 2.24 para cálculo de oclusão:

$$O_{média} = H_{médio} \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot (1 - 2 \cdot SL) \quad (2.24)$$

Sendo:

$O_{média}$ = Oclusão Média

α = Ângulo de Varredura

$H_{médio}$ = Altura Média do Edifícios

SL = Sobreposição Lateral

5. Espaçamento entre os pontos de 0,5m até 1,5m. O espaçamento entre os pontos irá determinar a densidade dos modelos digitais. Este espaçamento é função da altura de voo, da velocidade da aeronave, frequência do pulso laser e ângulo de abertura, ou seja, quanto menor

a velocidade da aeronave, o ângulo de varredura e altura de voo maior será a densidade de ponto no terreno, ver tabela 04:

TABELA 04 – Espaçamento entre os Pontos

Frequência do Pulso Laser	Altura de voo	Velocidade da Aeronave	Ângulo de Varredura	Espaçamento Entre os Pontos
50 kHz	1.000m	220km/h	20°	0,66m
50 kHz	1.000m	220km/h	40°	0,95m
50 kHz	2.000m	220km/h	20°	0,95m
50 kHz	2.000m	220km/h	40°	1,35m
100 kHz	1.000m	220km/h	20°	0,47m
100 kHz	1.000m	220km/h	40°	0,66m
100 kHz	2.000m	220km/h	20°	0,66m
100 kHz	2.000m	220km/h	40°	0,95m

FONTE: Optech, 2008.

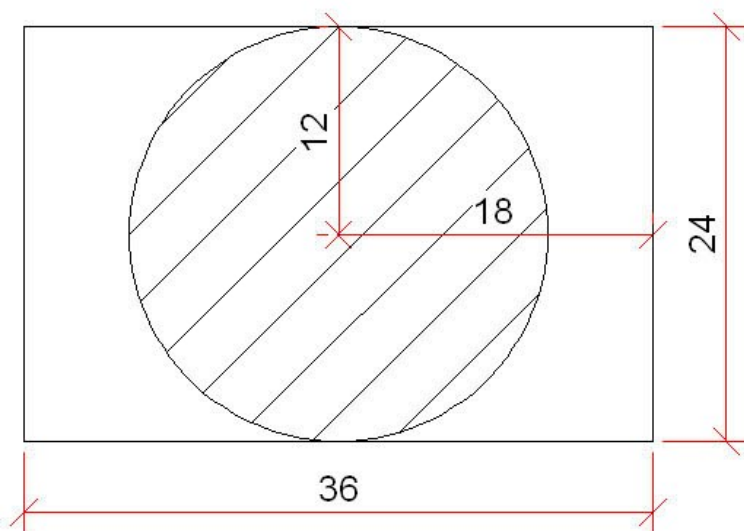
6. Faixas contínuas de no máximo 100km. Como este é um levantamento apoiado por GNSS, aconselha-se não realizar faixas muito longas, pois a precisão do levantamento pode ficar comprometida, uma vez que o PDOP pode variar entre o começo e o final das faixas;
7. Sobreposição Lateral entre 10% e 30%. Este valor varia conforme a ondulação do terreno. Caso se tenha um terreno plano, pode-se adotar o valor de 10% para garantir a continuidade dos dados laser. Em terrenos ondulados, aconselha-se usar o valor de 30%. Pode-se admitir uma variação de $\pm 5\%$ para a superposição lateral, devido às condições de vento e/ou ondulação do terreno;
8. O sentido do levantamento SLSA não é um fator importante para um projeto. Aconselha-se otimizar o sentido do levantamentos de maneira a minimizar as horas de voo, sem a necessidade de voos Norte-Sul ou Leste-Oeste, já que o levantamento SLSA é apoiado por GNSS e Sistema Inercial;
9. A rotação do ângulo formado pelo eixo do sensor laser e a vertical do lugar deverá ser de no máximo 20° em cada uma das retomadas das faixas. Este cuidado deve-se ao fato de ser um levantamento apoiado

por GNSS, pois uma rotação superior a este valor pode haver uma perda de sinal do GNSS e comprometer o resultado final do levantamento;

10. O número de bases de apoio GNSS para o levantamento do SLSA é definido em função da área de estudo e suas dimensões. Esta área terá um raio máximo de abrangência, ou seja, a distância máxima entre a base GNSS e a aeronave de 50 km. Esta medida é para garantir a precisão no pós-processamento da trajetória da aeronave. O local de implantação da base deverá ter o mínimo de obstruções de sinal GNSS, uma vez que as observações GNSS requerem a intervisibilidade entre a estação e os satélites. Já que os sinais transmitidos podem ser absorvidos, refletidos ou refratados por objetos próximos à antena ou entre a antena e o satélite, recomenda-se que o horizonte em torno da antena esteja desobstruído acima de 15°. Os dados do GNSS devem ser observados, no máximo, a cada 1 s;
11. Utilizando somente o SLSA, pode ser realizado tanto de dia como à noite, pois não depende da luz do sol, porém exige condições atmosféricas recomendáveis, ou seja, que não haja presença de bruma seca, poeiras, neblina, fumaça ou nuvem abaixo da linha de voo (nuvens acima da linha de voo não interferem no levantamento). Para esta pesquisa, entretanto, devido à integração com câmara digital o voo só poderá ser realizado durante o dia no período de 9 horas da manhã até 16 horas;
12. Cada faixa de voo deverá ser iniciada a pelo menos 1km antes do início da área e finalizada a 1km após o término da área de levantamento;
13. A altura de voo deverá assegurar a manutenção da precisão pretendida na área de levantamento, não podendo oscilar mais que 5% em relação à altura planejada;
14. A sobreposição longitudinal das imagens pode variar entre 50% e 65%, pois este tipo de CDPF apresenta altos valores de distorções de lente na borda, como visto no certificado de calibração de câmara. Levando

em conta esta sobreposição, a área de trabalho das imagens sempre se encontrará a menor distorção de lentes. Esta área de menor distorção é circular e pode ser vista na figura 21;

FIGURA 21 – Área Circular (52%) de Utilização das Fotografias, valores em milímetros

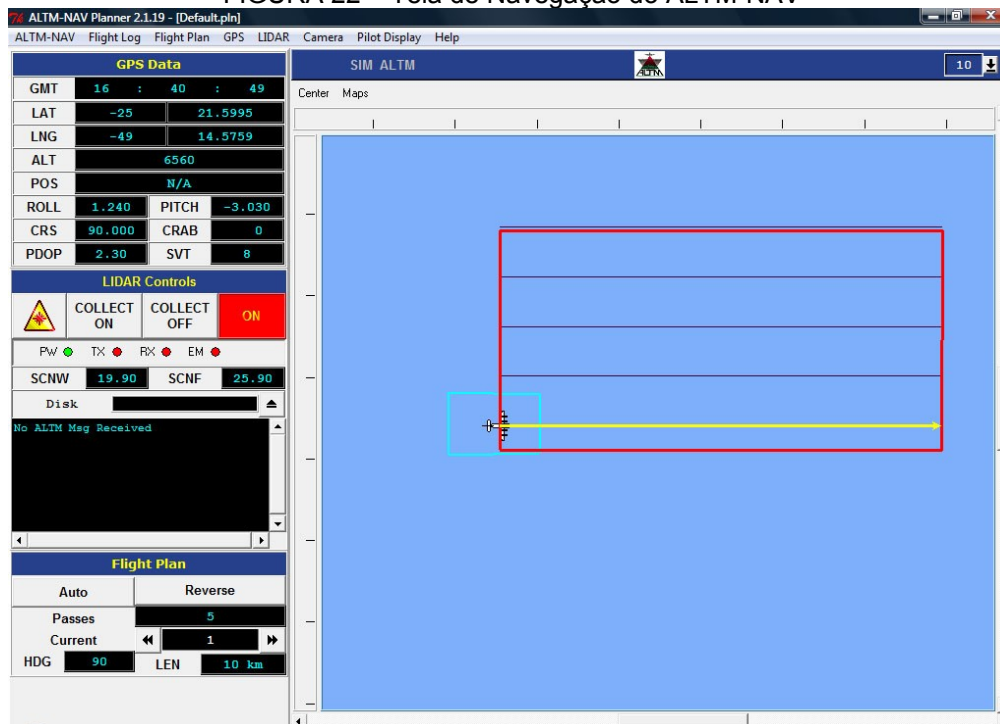


15. Velocidade do obturador da câmara deve variar entre 1/750 segundos até 1/1.000 segundos, para minimizar o arrasto causado nas imagens digitais, já que a câmara empregada nesta integração não tem compensadores de arrasto.

Para a coleta dos dados laser e para a navegação dos aerolevantamentos, é utilizado o *software* ALTM-NAV, instalado no *notebook* DELL – modelo Inspiron, sendo este parte integrante do ALTM 2050. Neste *software* são definidas as faixas e direções de voo para minimizar o tempo sobre a área. Este *software* também permite o acompanhamento em tempo real do voo, visualizando o andamento e verificando a cobertura da área na sua totalidade, bem como: a hora de Greenwich (GMT), sendo este o fator de integração entre os dados de GNSS, SNI, CDPF e dados Laser; as coordenadas da aeronave (LAT, LNG); a altitude de voo (ALT), verificando se a aeronave está na altitude planejada em escritório; a comunicação entre o GPS da aeronave e o computador de controle (POS); as rotações sofridas pela aeronave (ROLL, PITCH, CRAB), captados pelo SNI; direção de voo (CRS), verificando se a aeronave está na direção correta; as condições de geometria do

GNSS, como PDOP e número de satélites (SVT); e a qualidade do sinal recebido pelo sensor laser. Além da verificação visual do armazenamento dos dados laser no computador, ver estas informação na figura 22.

FIGURA 22 – Tela de Navegação do ALTM-NAV



Para a coleta, armazenamento das imagens digitais e controle da CDPF, é utilizado o *Software* KODAK CAMERA MANAGER, instalado no notebook DELL, modelo Latitude.

2.3.2 Etapa Terrestre

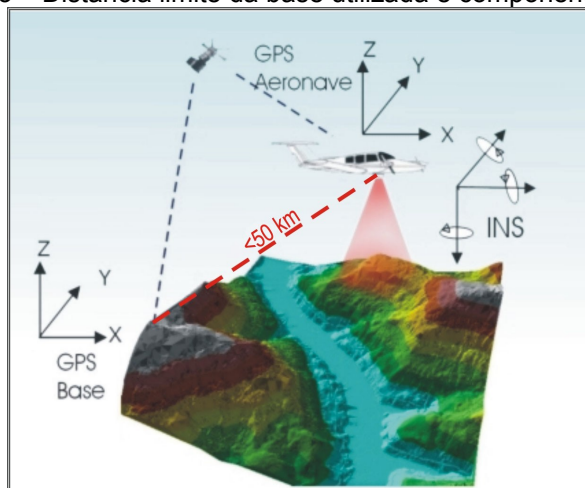
Para a realização da etapa aérea e pós-processamento dos dados do SLISA, é necessária a definição das bases GNSS de apoio para o aerolevantamento. Estas bases foram utilizadas para se aplicar a correção diferencial na trajetória da aeronave pelo método cinemático de levantamento GNSS. O número de bases GNSS definidas em campo é dado em função da área de estudo e suas dimensões. Loca-se uma base a cada raio de abrangência de 50 km. Normalmente, se opta por

utilizar para cada área de aerolevantamento dois receptores de dupla frequência (L1 e L2), localizados em dois pontos distintos, porém próximos, tendo sempre como segurança uma segunda fonte de dados, caso ocorra alguma interrupção na estação durante o levantamento.

As bases são definidas em pontos estrategicamente posicionados de maneira que atendam a alguns pré-requisitos:

- Distância máxima de 50 km da linha de base entre a aeronave e a base GNSS (Figura 23), garantindo, dessa maneira a precisão no pós-processamento da trajetória da aeronave;

FIGURA 23 – Distância limite da base utilizada e componentes do SLSA



- Local com o mínimo de obstruções de sinal GNSS. As observações GNSS requerem a intervisibilidade entre a estação e os satélites. Uma vez que os sinais transmitidos podem ser absorvidos, refletidos ou refratados por objetos próximos à antena ou entre a antena e o satélite, recomenda-se que o horizonte em torno da antena esteja desobstruído acima de 15° .

Para o transporte de coordenadas, aplica-se o método estático de levantamento GNSS para as estações bases de apoio do SLSA. Para a definição do tempo de rastreamento no método estático é observada a tabela 05, levando em conta os comprimentos da linha de base, conforme as recomendações do IBGE em 2008.

TABELA 05 – Tempo de rastreio em função do comprimento da linha de base

Linha de Base	Tempo de observação	Equipamento Utilizado	Precisão
00 – 05 Km	05 – 10 min	L1 ou L1/L2	5 - 10 mm + 1 ppm
05 – 10 Km	10 – 15 min	L1 ou L1/L2	5 - 10 mm + 1 ppm
10 – 20 Km	10 – 30 min	L1 ou L1/L2	5 - 10 mm + 1 ppm
20 – 50 Km	02 – 03 h	L1/L2	5 mm + 1 ppm
50 – 100 Km	03 – 04 h	L1/L2	5 mm + 1 ppm
> 100 Km	> 04 h	L1/L2	5 mm + 1 ppm

Fonte: IBGE, 2008.

O Método Estático se baseia no transporte das coordenadas a partir de uma estação conhecida. Neste caso, dois ou mais receptores fixos observam os mesmos satélites durante um intervalo de tempo, sendo determinadas as componentes dos raios vetores definidos pelas estações com uma precisão de 1 a 2 partes por milhão – ppm. As bases GNSS utilizadas nesta pesquisa foram transportadas da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo – RBMC e estão referenciadas ao Datum nacional SIRGAS2000, com altitude geométrica.

3 MATERIAL E MÉTODO

3.1 MATERIAL

Os materiais que foram utilizados na pesquisa estão descritos a seguir, sendo estes fundamentais para que o método proposto fosse realizado. Estes materiais foram cedidos pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, localizado em Curitiba no Estado do Paraná, com o intuito de incentivar a pesquisa e ampliar o conhecimento dos pesquisadores e profissionais da área de Fotogrametria quanto ao atual emprego da tecnologia do SLSA na área de Ciências Geodésicas.

a) Computadores

1. Estações DELL, modelos: Latitude, Inspiron e Xeon;

b) Aquisição dos dados SLSA e Fotogramétricos

2. SLSA, modelo ALTM 2050 (2002);
3. *Software* ALTM-NAV, versão 2.1.19 (2008);
4. CDPF, modelo KODAK DSC Pro14n (2003);
5. *Software* KODAK CAMERA MANAGER, versão 4.2 (2004);

c) Processamento Fotogramétrico

6. *Software* ERDAS Imagine, versão 8.7 (2004);

d) Processamento dos dados SLSA

7. *Software* Extract Disc, versão 6.7.3 (2003);
8. *Software* APPLANIX, versão 4.24.37 (2002);
9. *Software* REALM, versão 3.0.2 (2002);
10. *Software* TerraScan, versão 008.001 (2008);
11. *Software* TerraMatch, versão 008.001 (2008);
12. *Software* TerraModeler, versão 008.001 (2008);
13. *Software* Quick Terrain Modeler, versão 6.0.4 (2007);

e) Geração da Orfotocarta

14. *Software* ArcGIS, versão 9.2 (2007);

15. *Software* ERDAS Imagine, versão 8.7 (2004);
16. *Software* MicroStation V8, versão 08.00.02.20 (2002);
17. *Software* InRoads, versão 08.03.00.00 (2003);

f) Levantamento GNSS

18. GPS LEICA, modelo SR 530;
19. *Software* SKI-PRO, versão 2.5.0.0 (2004);

g) Dados (ver tabela 06)

20. Imagens Digitais Aéreas da CDPF no Município de Curitiba (24/10/2006), nas proximidades do Aeroporto Bacacheri, sendo utilizadas 23 imagens para a determinação dos parâmetros de orientação exterior da CDPF via Sistema de Navegação Inercial do SLISA;
21. Imagens Digitais Aéreas da CDPF no Município de Curitiba (20/09/2007), nas proximidades do Aeroporto Bacacheri, sendo utilizadas 22 imagens para a produção de ortofotos urbanas na escala 1/2.000;
22. Imagens Digitais Aéreas da CDPF no Município de Curitiba (07/05/2009), nas proximidades do Aeroporto Bacacheri, sendo utilizadas 25 imagens para a produção de ortofotos urbanas na escala 1/2.000;
23. Modelo Digital de Terreno – MDT do SLISA no Município de Curitiba (24/10/2006), nas proximidades do Aeroporto Bacacheri, com área de 10 km² para a produção de ortofotos urbanas na escala 1/2.000;
24. Parâmetros do Sistema de Navegação Inercial – SNI do SLISA no recobrimento aéreo do Município de Curitiba (24/10/2006), nas proximidades do Aeroporto Bacacheri, para a determinação dos parâmetros de orientação exterior da CDPF via Sistema de Navegação Inercial do SLISA;
25. Parâmetros do Sistema de Navegação Inercial – SNI do SLISA no recobrimento aéreo do Município de Curitiba

(20/09/2007), nas proximidades do Aeroporto Bacacheri, para a produção de ortofotos urbanas na escala 1/2.000;

26. Parâmetros do Sistema de Navegação Inercial – SNI do SLSA no recobrimento aéreo do Município de Curitiba (07/05/2009), nas proximidades do Aeroporto Bacacheri, para a produção de ortofotos urbanas na escala 1/2.000.

TABELA 06 – Configuração do Aerolevantamento

	SLSA	CDPF	SLSA	CDPF	SLSA	CDPF
Data	24/10/2006		20/09/2007		07/05/2009	
Altura de voo	1.000 m		1.000 m		1.000 m	
Área do Aerolevantamento	Aeroporto Bacacheri		Aeroporto Bacacheri		Aeroporto Bacacheri	
Ângulo de abertura lateral	-----	37°	40°	37°	40°	37°
Largura da Faixa	-----	670 m	720 m	670 m	720 m	670 m
GNSS – PDOP	< 3		< 3		< 3	
GNSS – Satélites	> 6		> 6		> 6	
Velocidade da Aeronave	220 km/h		220 km/h		220 km/h	
Resolução	-----	0,23 m	0,65 m	0,23 m	0,65 m	0,23 m
Sobreposição Longitudinal	-----	60%	-----	60%	-----	60%
Sobreposição Lateral	-----	44%	50%	44%	30%	26%
Velocidade do Obturador	-----	1/1.000	-----	1/1.000	-----	1/1.050
Tipo de Dados	SNI	Imagens	SNI e MDT	Imagens	SNI e MDT	Imagens
Utilização dos Dados	Parâmetros de Orientação Exterior		Ortofotos Urbanas		Ortofotos Urbanas	
Escala da Ortofoto	-----		1/2.000		1/2.000	
Espaçamento do MDT	-----		0,50 m		0,50 m	

3.1.1 Especificação Técnica do SLSA

O Sistema Laser Scanner Aerotransportado – SLSA (ver figura 24) empregado na pesquisa foi o ALTM 2050, de propriedade do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, com as seguintes especificações:

1. Fabricante do equipamento: **Optech Incorporated – 2002;**
2. Modelo do Laser: **ALTM 2050 – Airborne Laser Terrain Mapper;**

3. Número de Série: **02d136**;
4. Sistema Inercial: **Applanix – 200 Hz**;
5. Receptor GNSS: **Novatel Millennium – L1/L2**;
6. Frequência do Pulso Laser: **50 kHz – 50.000 pulsos por segundo**;
7. Comprimento de Onda do Laser: **1.064 nm**;
8. Divergência do Feixe: **0,20 mrad a 650 m, nominal**;
9. Classificação do Laser: **Classe IV – FDA CFR 21**;
10. Tipo de coleta de dados: **Primeiro e último retorno do pulso**;
11. Tipo de Imagem: **Intensidade do retorno – Tons de Cinza, 8 bits**;
12. Altitude de Operação: **200 m a 2.000 m, nominal**;
13. Frequência de Varredura: **Variável de 0 até 100 Hz**;
14. Ângulo de varredura: **Variável 0° a 40°**;
15. Capacidade de armazenamento: **36 GigaBytes**;
16. Densidade de pontos: **Variável de 400.000 a 4.000.000**;
17. Número de pontos por m²: **Variável de 1 a 4 pontos**;
18. Precisão Horizontal: **0,50 m – 1 sigma a 1.000 m, nominal**;
19. Precisão Vertical: **0,15 m – 1 sigma a 1.000 m, nominal**.

FIGURA 24 – Laser Scanner Aerotransportado, modelo ALTM 2050



3.1.2 Especificação Técnica da CDPF

A Câmara Digital de Pequeno Formato – CDPF (ver figura 25) empregada na pesquisa foi a KODAK DCS Pro14n, de propriedade do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, com as seguintes especificações técnicas:

1. Fabricante: **Eastman KODAK Company**;
2. Modelo da Câmara: **KODAK DCS Pro14n**;
3. Número de Série: **P14N – 09427**;
4. Tipo de Lentes: **AF Nikkor 35mm f/2D**;
5. Número de Série: **342191**;
6. Tipo de Sensor: **RGB CMOS Imager – 12 bits**;
7. Dimensão do Sensor: **36 x 24 mm**;
8. Número de Pixel Efetivos: **4500 x 3000 pixel – 13,5 MegaBytes**;
9. Dimensão do Pixel: **8 μ m**;
10. Distância Focal Nominal: **35 mm**;
11. Resolução Espacial da Imagem: **0,23 m a 1.000m, nominal**.

FIGURA 25 – Câmara Digital, modelo KODAK DCS Pro14n



3.1.3 Certificado de Calibração da CDPF

Para a obtenção dos parâmetros de orientação interior (f , x_0 , y_0 , K_1 , K_2 , K_3 , P_1 , P_2), é necessário realizar uma calibração da CDPF. Existem vários métodos de calibração, tais como: Método do Multicolimador, Método do Goniômetro, Método Estelar, Método dos Campos Misturados, e Método das Câmaras Convergentes.

Nesta calibração, foi utilizado o método de câmaras convergentes, pois é um método robusto na determinação de parâmetros. Mais informações sobre este método de calibração ver Olivas 1980. Seguindo este método, as fotografias foram tomadas em uma parede vertical com alvos pré-sinalizados (ver figura 26) e com suas coordenadas conhecidas.

FIGURA 26 – Alvos do Campo de Calibração



A calibração da CDPF, modelo KODAK DCS Pro14n, foi realizada pelo Laboratório de Fotogrametria da Universidade Federal do Paraná, onde foram determinados os parâmetros de orientação interior – POI (f , x_0 , y_0 , K_1 , K_2 , K_3 , P_1 , P_2) da CDPF utilizada nesta pesquisa (ver tabela 07).

TABELA 07 – POI (KODAK DCS Pro14n – Lente 35 mm)

	f	x_0	y_0	K_1	K_2	K_3	P_1	P_2
mm	35,9749	0,1525	0,1391	-6,61E-05	5,70E-08	(*)	2,11E-05	(*)
σ (mm)	0,0070	0,0070	0,0030	9,60E-07	2,22E-09	(*)	1,75E-06	(*)
Pixel	4496,8625	19,0625	17,3875	-5,28E-07	4,56E-10	(*)	1,69E-07	(*)

Calibração realizada em 2006. (*) Parâmetros não significativos.

3.1.4 Integração da CDPF com o SLSA

Para realizar a integração da CDPF na aeronave e no SLSA, foi necessária a elaboração de dois itens: caixa de fixação da CDPF (ver figuras 27 e 28) na posição zenital (Z normal ao CMOS) e cabo de conexão para a integração dos parâmetros de orientação exterior da CDPF via Sistema de Navegação Inercial do SLSA.

A caixa de fixação foi feita em material acrílico com dimensões aproximadas de 18cm x 22cm x 10cm (largura, comprimento e altura, respectivamente), com espuma de poliuretano expansível para minimizar as vibrações sofridas pela CDPF durante a fase de voo.

FIGURA 27 – Caixa de Fixação, Espuma de Poliuretano e Cabos de Conexão (Vista Inferior)



FIGURA 28 – Espuma de Poliuretano e Cabos de Conexão (Vista Superior)



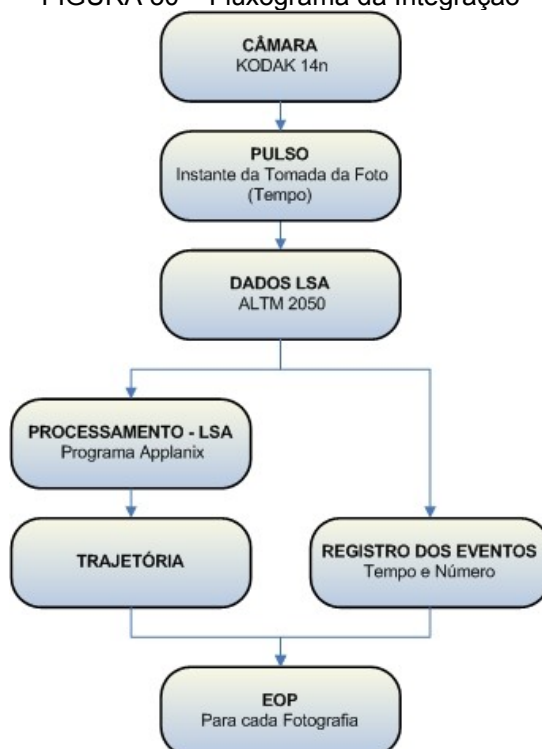
O cabo de conexão (ver figura 29) é a parte fundamental desta pesquisa, pois este proporciona a ligação da CDPF ao sistema de navegação inercial do SLISA. Esta conexão é feita através da porta RS-232.

FIGURA 29 – Cabo de Conexão



O processo de integração acontece na tomada de cada fotografia. Neste momento, a CDPF envia um pulso através do cabo ao SLISA (ver figura 30). Este pulso, ou seja, o tempo do evento é registrado e armazenado. Este tempo é usado posteriormente para processar e calcular a informação de POE de cada fotografia.

FIGURA 30 – Fluxograma da Integração



A adaptação da CDPF na aeronave foi feita de maneira que a mesma sofresse os mesmos efeitos das rotações (ω , φ , κ) do SLSA e assim possibilitar o uso do sistema de navegação inercial do SLSA. Logo, esta foi instalada na mesma plataforma do sensor do SLSA (ver figuras 31 e 32).

FIGURA 31 – Montagem da CDPF na Aeronave (Interno)



FIGURA 32 – Montagem da CDPF na Aeronave (Externo)



3.1.5 Campo de Calibração

Para obtenção de resultados mais confiáveis no georreferenciamento indireto e consequentemente na determinação dos parâmetros de orientação exterior da CDPF, foi criado um campo de calibração no município de Curitiba, nas proximidades do Aeroporto do Bacacheri, com alvos pré-sinalizados e levantados por GNSS pelo método estático rápido, no sistema de referência nacional SIRGAS2000. Estes alvos também foram utilizados para avaliação geométrica das ortofotos. Os alvos foram pintados de branco no asfalto escuro, de forma a possibilitar uma melhor visualização, devido ao contraste que se obtém desta composição (ver figuras 33 e 34).

FIGURA 33 – Confeção dos Alvos Pré-sinalizados



FIGURA 34 – Alvos Pré-sinalizados



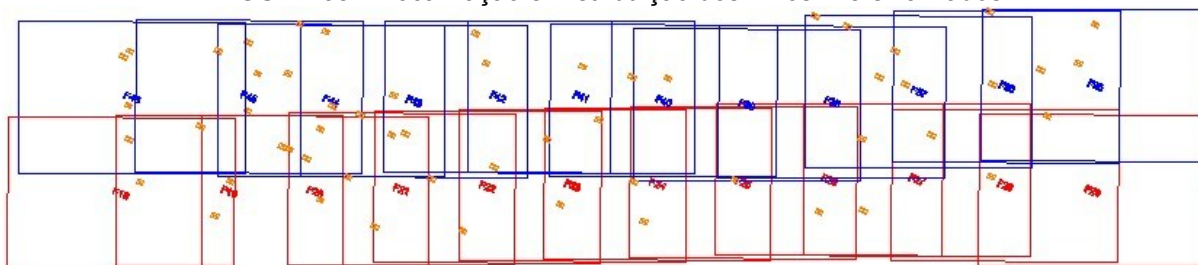
A dimensão do alvo foi de 60cm para que pudessem ser visto na imagem aérea da CDPF com aproximadamente 7 pixels, pois a configuração de voo para esta área é de 1.000m de altura sobre o terreno e lente com distância focal de 35mm, o que se permite obter um pixel de 23cm. Na tabela 08, podemos ver melhor esta relação do tamanho do pixel com a altura de voo para uma lente de 35mm.

TABELA 08 – Altura de voo x Resolução (Lente 35mm)

Altura de voo (m)	Comprimento (m)	Largura (m)	Resolução (cm)
600	600	400	14
700	700	465	16
800	800	530	18
900	900	600	20
1.000	1.000	665	23
1.100	1.100	730	25
1.200	1.200	800	27
1.300	1.300	865	29
1.400	1.400	930	31
1.500	1.500	1.000	34
1.600	1.600	1.065	36
1.700	1.700	1.130	38
1.800	1.800	1.200	40
1.900	1.900	1.265	43
2.000	2.000	1.330	45

A localização dos alvos e a distribuição (ver figura 35) foram feitas de maneira a atingir a maior quantidade de fotos, permitindo realizar uma fototriangulação por feixe de raio com maior confiabilidade.

FIGURA 35 – Localização e Distribuição dos Alvos Pré-sinalizados

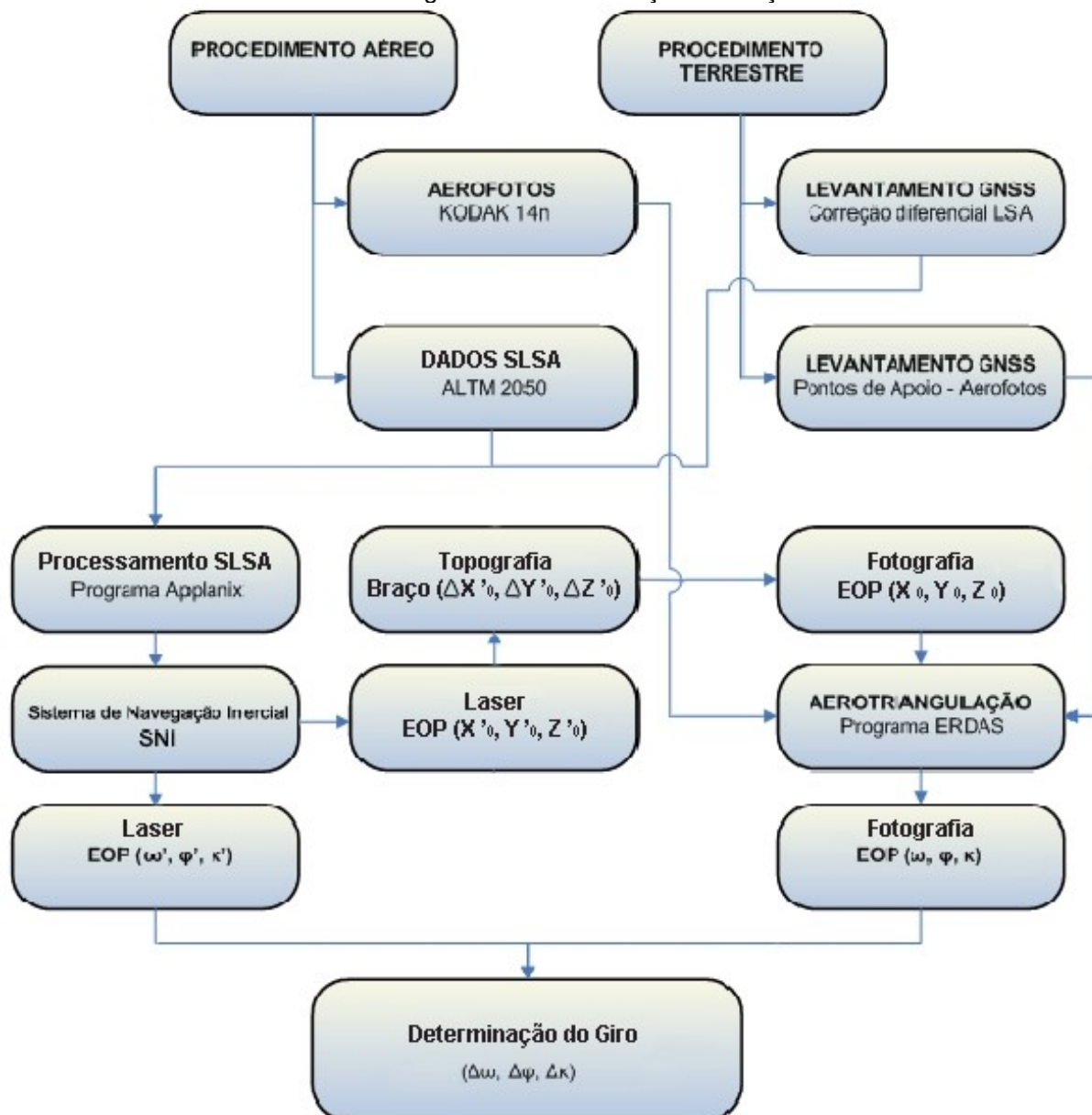


3.2 MÉTODO

3.2.1 Determinação do Braço e do Giro (ΔX_0 , ΔY_0 , ΔZ_0 , $\Delta\omega$, $\Delta\varphi$, $\Delta\kappa$), via Sistema de Navegação Inercial do SLSA

O método descrito neste tópico aborda todo o processo para determinação do braço e do giro da CDPF via Sistema de Navegação Inercial – SNI do SLSA. Este método está sintetizado na forma de fluxograma (ver figura 36).

FIGURA 36 – Fluxograma da Determinação do Braço e do Giro



3.2.1.1 Procedimento Aéreo e Terrestre

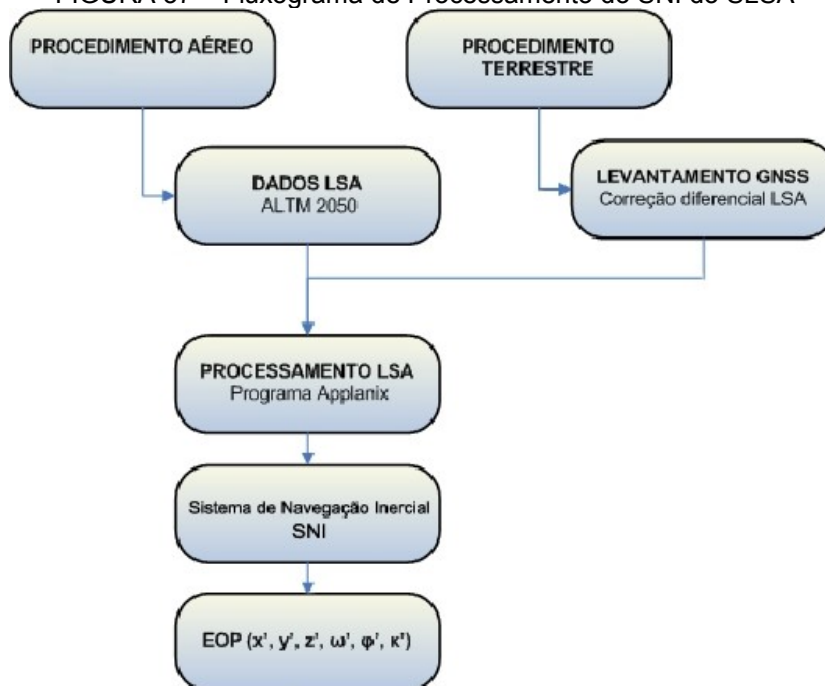
Os Procedimentos aéreos e terrestres seguiram a especificação técnica do tópico 2.3 (página 53). Partindo desta especificação técnica, foi realizado um voo em 24 de outubro de 2006 sobre o campo de calibração (ver tópico 3.1.5) para aquisição de 23 imagens digitais aéreas da CDPF, KODAK Pro14n, e dos parâmetros do Sistema de Navegação Inercial do SLSA, ALTM 2050. Este aerolevanteamento foi realizado da seguinte maneira:

- Altura de voo 1.000 m;
- Distância Máxima de 30 km da Base GNSS e a Aeronave;
- Configuração da Base GNSS de Referência;
 - ◆ PDOP inferior a três;
 - ◆ Número de Satélites superior a seis.
- Configuração da Trajetória GNSS da aeronave;
 - ◆ PDOP inferior a três;
 - ◆ Número de Satélites superior a seis.
- Registro do Sistema de Navegação Inercial do SLSA;
 - ◆ Parâmetros de Orientação Exterior (X'_0 , Y'_0 , Z'_0 , ω' , ϕ' , κ') do sensor laser na tomada das imagens.
- Configuração das Imagens Digitais Aéreas.
 - ◆ Ângulo de Abertura de 37° ;
 - ◆ Largura da faixa de 670 m;
 - ◆ Resolução Espacial de 23 cm;
 - ◆ Sobreposição Longitudinal de 60%;
 - ◆ Sobreposição Lateral de 44%;
 - ◆ Velocidade do obturador de 1/1.000 s.

3.2.1.2 Processamento do SNI do SLSA

O processamento dos parâmetros do Sistema de Navegação Inercial – SNI do sensor Laser será realizado conforme a figura 37.

FIGURA 37 – Fluxograma de Processamento do SNI do SLSA



Depois de realizados os procedimentos aéreos e terrestres, foi necessário extrair os dados do SLSA. Para isto, foi utilizado o software “*Extract Disc*”. Este software separa os dados em duas partes, sendo a primeira o GNSS e o SNI da aeronave e a segunda os dados do Laser (tempos e ângulos).

Após extraídos os dados coletados durante o voo do SLSA, foi processada a trajetória da aeronave no software “*APPLANIX*”, utilizando os arquivos brutos do GNSS de campo, do GNSS da aeronave e dos dados do Sistema de Navegação Inercial – SNI da aeronave.

A trajetória foi processada pelo método cinemático automaticamente de dois modos: no primeiro, o processamento é obtido no sentido do voo, ou seja, da decolagem até a aterrissagem. No segundo, é informado o sentido contrário da aterrissagem até a decolagem. Neste tipo de ambiente computacional, é possível selecionar a melhor parte de cada solução calculada, sendo que na primeira solução, a melhor parte é da metade da trajetória para o final (aterrissagem), já que as ambiguidades GNSS se fixam melhor no final da trajetória. Assim, a melhor parte da segunda solução é a metade inicial da trajetória. Todos os dados processados da trajetória foram calculados no Datum SIRGAS2000 e unidos com o SNI do SLSA,

gerando os parâmetros de orientação exterior (X'_0 , Y'_0 , Z'_0 , ω' , ϕ' , κ') do sensor laser na tomada de cada imagem, onde estes serão utilizados no tópico 3.2.1.3 e no tópico 3.2.1.4.

3.2.1.3 Determinação do Braço (ΔX_0 , ΔY_0 , ΔZ_0)

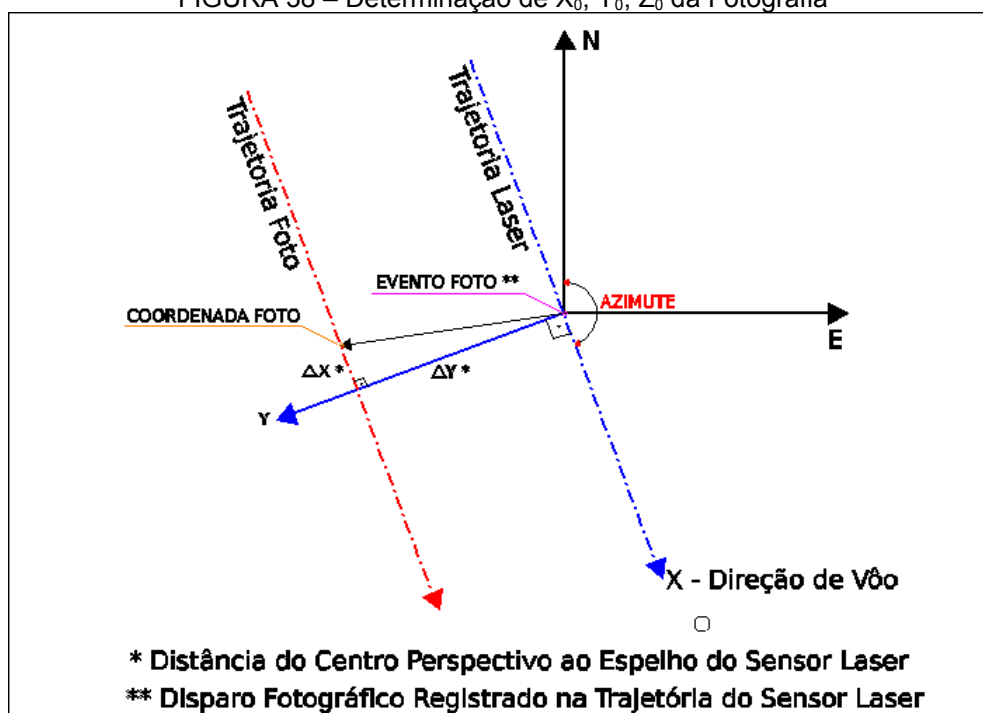
Para determinar a posição (X_0 , Y_0 e Z_0) dos POE de cada imagem utilizada no processo de aerotriangulação do tópico 3.2.1.4, foi realizado um levantamento topográfico para determinar o braço (ΔX_0 , ΔY_0 e ΔZ_0) da CDPF em relação ao SNI do SLISA. Os resultados obtidos deste levantamento podem ser vistos na tabela 09.

TABELA 09 – Vetor de Distância CDPF ao SNI

ΔX_0	σ	ΔY_0	σ	ΔZ_0	σ
-0,039 m	0,007 m	0,180 m	0,007 m	-0,074 m	0,007 m

Após determinados estes valores, foi possível determinar o centro perspectivo X_0 , Y_0 e Z_0 de cada fotografia digital (figura 38), através das fórmulas 3.1, 3.2 e 3.3.

FIGURA 38 – Determinação de X_0 , Y_0 , Z_0 da Fotografia



$$X_{0(CDPF)} = X'_{0(SLSA)} + \sin\left(Azimuth_{(SLSA)} + \tan^{-1} \frac{\Delta X_0}{\Delta Y_0}\right) \cdot \left(\sqrt{\Delta X_0^2 + \Delta Y_0^2}\right) \quad (3.1)$$

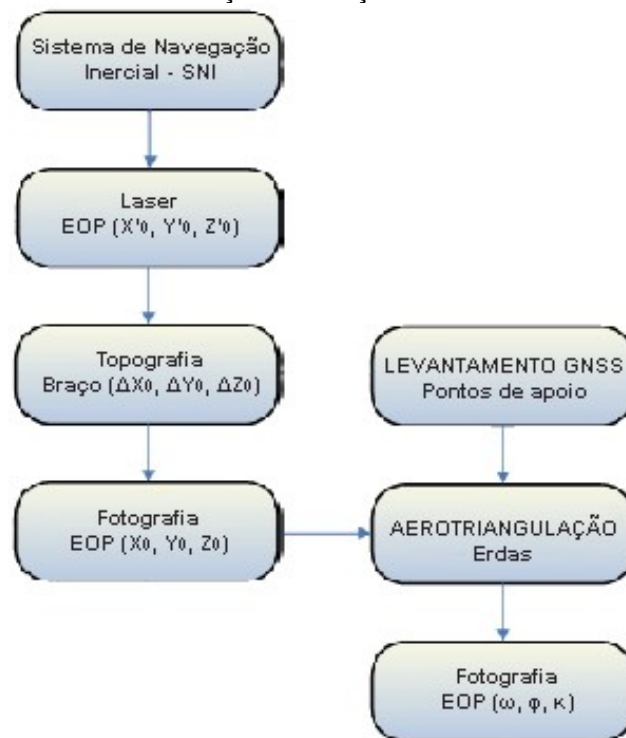
$$Y_{0(CDPF)} = Y'_{0(SLSA)} + \cos\left(Azimuth_{(SLSA)} + \tan^{-1} \frac{\Delta X_0}{\Delta Y_0}\right) \cdot \left(\sqrt{\Delta X_0^2 + \Delta Y_0^2}\right) \quad (3.2)$$

$$Z_{0(CDPF)} = Z'_{0(SLSA)} + \Delta Z_0^2 \quad (3.3)$$

3.2.1.4 Determinação da rotação (ω , ϕ , κ) dos POE de cada imagem

Neste tópico, será abordada toda a aerotriangulação por bloco (ver figura 39) para a determinação da rotação (ω , ϕ , κ) dos POE de cada imagem aérea obtida, uma vez que o X_0 , Y_0 e Z_0 já é conhecido e vem do SNI do SLSA, conforme tópico 3.2.1.3. Estes parâmetros de rotação serão utilizados no tópico 3.2.1.5 para comparar com os valores obtidos do sistema de navegação inercial – SNI do SLSA, determinando assim os valores de giro ($\Delta\omega$, $\Delta\phi$, $\Delta\kappa$) da CDPF em relação ao SNI do SLSA.

FIGURA 39 – Determinação da rotação dos POE de cada imagem



O processamento da aerotriangulação foi inteiramente realizado no módulo de Fotogrametria “Leica Photogrammetry Suite” – LPS, do software “Erdas Imagine”, da fabricante “Leica Geosystems”. O módulo LPS possui uma sequência dinâmica de tarefas que foram seguidas para obtenção dos parâmetros de orientação exterior (rotação) de cada uma das imagens.

Primeiramente, foi determinado qual modelo de processamento seria usado (*setup model*). Este modelo está baseado no tipo de dado que foi inserido no programa. Para a presente pesquisa, o modelo empregado foi o “*Digital Camera*”. Este modelo permitiu manipular as imagens da CDPF que não possuem marcas fiduciais, permitindo a entrada dos parâmetros de orientação interior – POI, oriundos de um processo de calibração de câmaras (ver tópico 3.1.3).

O sistema geodésico de referência definido no programa foi o sistema SIRGAS2000, com altitude elipsoidal (geométrica) e no sistema de projeção UTM. Este sistema foi adotado, pois todos os dados utilizados na pesquisa estavam em SIRGAS2000, facilitando assim, o processamento dos dados e evitando quaisquer erros grosseiros de incompatibilidade de sistemas.

Para realização do processo de aerotriangulação, também foi necessário a determinação dos pontos homólogos (ver figura 40). Os pontos fotogramétricos empregados no processamento do bloco foram classificados em: pontos de ligação (*Tie Points*), lidos manualmente totalizando 35 pontos e densificados por processo automático totalizando 483 pontos; pontos de controle (*Control Points*), lidos manualmente totalizando 37 pontos; e pontos de verificação (*Check Points*), lidos manualmente totalizando 10 observações. A figura 41 ilustra a determinação dos pontos homólogos nas imagens, no programa “*Erdas Imagine*”.

FIGURA 40 – Pontos homólogos entre imagens e entre faixa

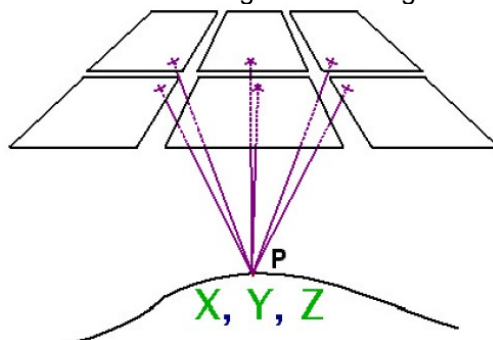
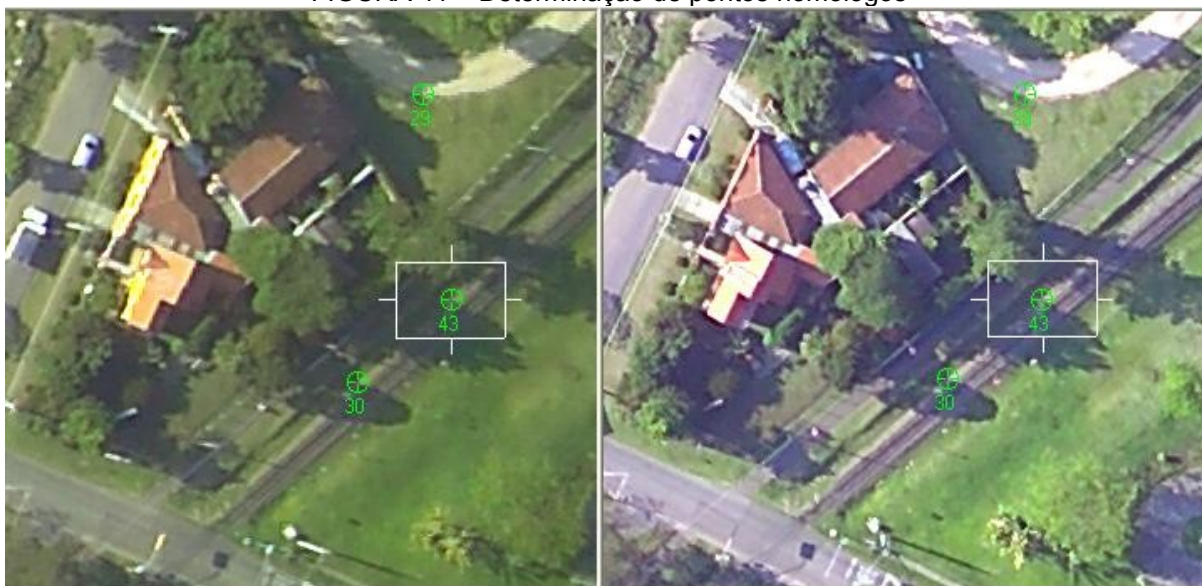


FIGURA 41 – Determinação de pontos homólogos



Para os pontos de controle e verificação, levantados por GNSS, foi necessário a inserção das coordenadas no sistema geodésico de referência, SIRGAS2000 – UTM, para vincular a orientação dos modelos fotogramétricos a um referencial geodésico local. Depois de determinados os pontos homólogos, foi inserido o centro de projeção (X_0 , Y_0 , Z_0) de cada imagem que foram calculados pelas formula 3.1, 3.2 e 3.3 do tópico 3.2.1.3.

Os centros de projeção entraram no processamento do bloco como pontos de apoio (injunção de posição). Finalizadas as etapas anteriores, foi processada a aerotriangulação por “*Bundle Adjustment Method*” para determinação da rotação (ω , ϕ , κ) dos POE de cada imagem no momento da tomada das imagens.

3.2.1.5 Determinação do Giro ($\Delta\omega$, $\Delta\phi$, $\Delta\kappa$)

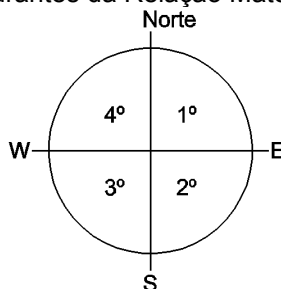
Após determinadas as rotações (ω , ϕ , κ) dos POE de cada imagem digitais aéreas (tópico 3.2.1.4), foi possível determinar o giro ($\Delta\omega$, $\Delta\phi$, $\Delta\kappa$) entre o SNI do SLISA e a CDPF. Esta possibilidade existiu pelo fato de haver uma integração simultânea entre o SLISA e a CDPF, assim permitindo conhecer as rotação (ω' , ϕ' , κ') dos POE do sensor laser no momento da tomada de cada imagem.

Após analisados os POE do SLSA e da aerotriangulação, verificou-se que as rotações dos POE do SLSA e as rotações dos POE da aerotriangulação têm uma relação matemática de ângulos. Esta relação está demonstrada na tabela 10.

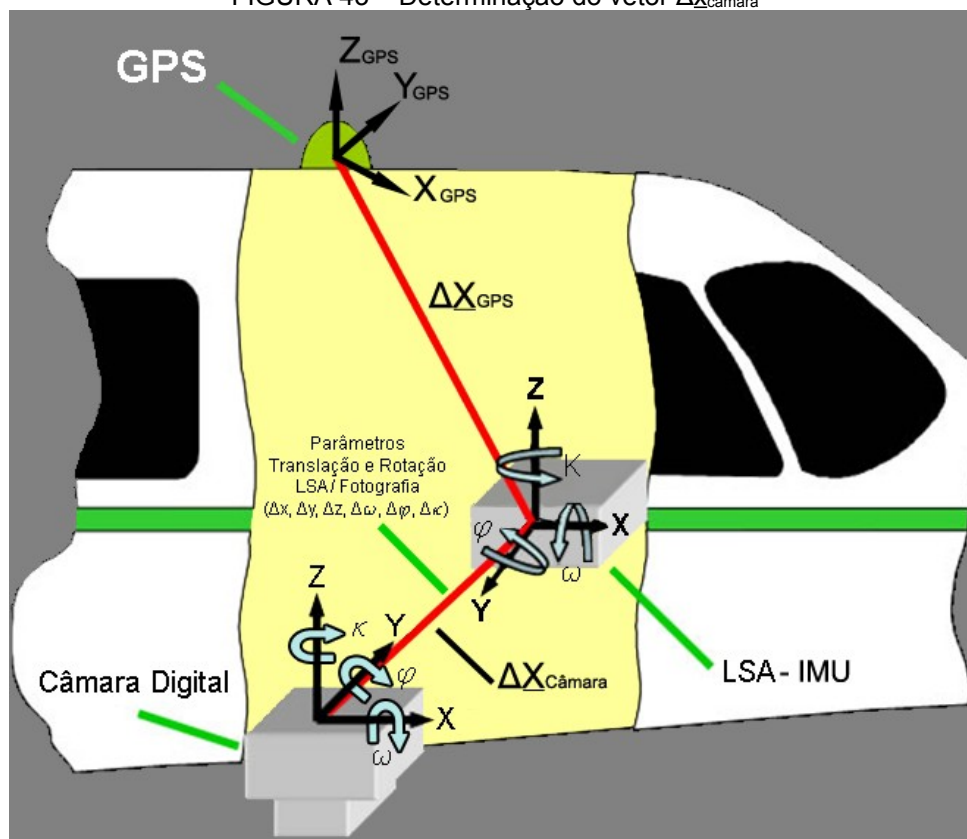
TABELA 10 – Relação Matemática dos Ângulos entre SNI e Aerotriangulação	
4° Quadrante	1° Quadrante
$\Delta\omega = \omega_{\text{FOTO}} - \omega_{\text{SNI}}$ $\Delta\phi = \phi_{\text{FOTO}} - \phi_{\text{SNI}}$ $\Delta\kappa = (270^\circ - \kappa_{\text{SNI}}) - \kappa_{\text{FOTO}}$	$\Delta\omega = \omega_{\text{FOTO}} - \omega_{\text{SNI}}$ $\Delta\phi = [\phi_{\text{SNI}} \times (-1)] - \phi_{\text{FOTO}}$ $\Delta\kappa = [90^\circ + \kappa_{\text{SNI}} \times (-1)] - \kappa_{\text{FOTO}}$
3° Quadrante	2° Quadrante
$\Delta\omega = \omega_{\text{FOTO}} - [\omega_{\text{SNI}} \times (-1)]$ $\Delta\phi = \phi_{\text{FOTO}} - \phi_{\text{SNI}}$ $\Delta\kappa = (270^\circ - \kappa_{\text{SNI}}) - \kappa_{\text{FOTO}}$	$\Delta\omega = \omega_{\text{FOTO}} - [\omega_{\text{SNI}} \times (-1)]$ $\Delta\phi = [\phi_{\text{SNI}} \times (-1)] - \phi_{\text{FOTO}}$ $\Delta\kappa = (270^\circ - \kappa_{\text{SNI}}) - \kappa_{\text{FOTO}}$

Para identificar qual das relações matemáticas da tabela 10 será utilizada na determinação do giro, primeiramente, tem-se que conhecer a direção do voo, pois a direção que irá determinar o quadrante, logo irá apontar a formulação que se deve usar na conversão dos POE do SLSA para os POE da aerotriangulação. Por exemplo, se o voo tem direção do sudoeste, deve-se utilizar a relação matemática de ângulos do 3° quadrante (ver figura 42). Depois de serem determinadas estas relações foram determinas os valores de giro ($\Delta\omega$, $\Delta\phi$, $\Delta\kappa$) do SNI para CDPF, bem como as suas precisões.

FIGURA 42 – Quadrantes da Relação Matemática dos Ângulos



Resumidamente, o braço (ΔX_0 , ΔY_0 , ΔZ_0) foi determinado por topografia (ver tópico 3.2.1.3), ao passo que o giro ($\Delta\omega$, $\Delta\phi$, $\Delta\kappa$) foi determinado utilizando os dados dos processados do tópico 3.2.1.2 e do tópico 3.2.1.4, determinando assim o vetor $\Delta X_{\text{câmara}}$, ver figura 43.

FIGURA 43 – Determinação do vetor $\Delta X_{\text{câmara}}$ 

3.2.2 Produção de Ortofotos

Os procedimentos aéreos e terrestres para a produção de ortofotos seguiram a especificação técnica do tópico 2.3 (página 53). Partindo da especificação técnica, foram realizados dois voos: o primeiro em 20 de setembro de 2007 e o segundo em 05 de maio de 2009. Nestes voos foram adquiridos 22 e 25 imagens digitais aéreas da CDPF (KODAK Pro14n) respectivamente. Também foi adquirido os POE do Sistema de Navegação Inercial do SLSA (ALTM 2050), junto com Modelo Digital de Terreno. Estes aerolevantamentos foram realizados da seguinte maneira:

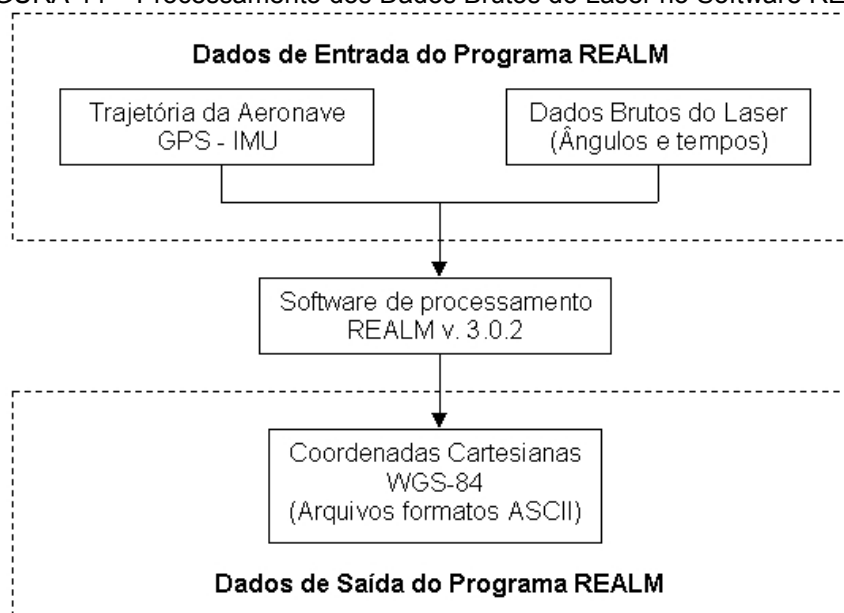
- Altura de voo 1.000 m;
- Distância Máxima de 30 km da Base GNSS e a Aeronave;
- Configuração da Base GNSS de Referência;
 - ◆ PDOP inferior a três;
 - ◆ Número de Satélites superior a seis.

- Configuração da Trajetória GNSS da aeronave;
 - ◆ PDOP inferior a três;
 - ◆ Número de Satélites superior a seis.
- Registro do Sistema de Navegação Inercial do SLSA;
 - ◆ Parâmetros de Orientação Exterior (X'_0 , Y'_0 , Z'_0 , ω' , ϕ' , κ') do sensor laser na tomada das imagens.
- Configuração dos dados do SLSA;
 - ◆ Ângulo de Abertura de 40°;
 - ◆ Largura da Faixa de 720 m;
 - ◆ Espaçamento dos pontos de 65 cm;
 - ◆ Sobreposição Lateral de 50%.
- Configuração das Imagens Digitais Aéreas.
 - ◆ Ângulo de Abertura de 37°;
 - ◆ Largura da faixa de 670 m;
 - ◆ Resolução Espacial de 23 cm;
 - ◆ Sobreposição Longitudinal de 60%;
 - ◆ Sobreposição Lateral de 44%;
 - ◆ Velocidade do obturador de 1/1.000 s.

Depois de realizados os voos, foi necessário extrair os dados do SLSA conforme realizado no tópico 3.2.1.2. Após extraídos os dados coletados durante o voo do SLSA, foi processada a trajetória da aeronave utilizando os arquivos brutos do GNSS de campo, do Sistema de Navegação Inercial – SNI da aeronave. A trajetória foi processada pelo método cinemático, conforme tópico 3.2.1.2. Os dados processados da trajetória foram calculados no sistema de coordenadas SIRGAS2000. Assim, gerando um arquivo que será utilizado no processamento dos dados brutos do Laser para corrigir as rotações do SNI e também georreferenciar os dados do laser no sistema de referência SIRGAS2000.

Para realizar o processamento dos dados brutos, foi utilizado o software REALM, que utiliza a trajetória calculada e os dados brutos da Laser (tempos e ângulos) para a obtenção da nuvem de pontos com coordenadas cartesianas no sistema SIRGAS2000, conforme a figura 44.

FIGURA 44 – Processamento dos Dados Brutos do Laser no Software REALM



Concluídas as fases de trabalho anteriores, foi necessário realizar um novo processamento para projetar os dados no sistema plano UTM (*Universal Transversal Mercator*), gerando assim, uma nuvem de pontos sem distinção entre o terreno e os objetos contidos na superfície, sendo necessária mais uma etapa de classificação de pontos, gerando assim uma nuvem de pontos do terreno.

A partir do software TerraScan, foi realizada a classificação dos pontos, para diferenciar quais elementos correspondem ao terreno e quais correspondem à vegetação, à edificação e a outros elementos da superfície. A classificação foi realizada de maneira automática na nuvem de pontos com o objetivo de separá-los em pontos que tocaram a superfície terrestre e pontos que tocaram outros elementos (objetos).

Depois de realizadas as etapas mencionadas anteriormente, os produtos obtidos do processamento dos dados brutos do SLISA serão os seguintes: a) Nuvem de pontos com coordenadas UTM georreferenciadas no Sistema Geodésico SIRGAS2000, para gerar o Modelo Digital de Elevação – MDE (terreno e estruturas verticais) no formato texto; e b) Nuvem de pontos com coordenadas UTM georreferenciadas no Sistema Geodésico SIRGAS2000, para gerar o Modelo Digital de Terreno – MDT (apenas o terreno) no formato de texto. O MDT gerado com a nuvem de pontos será utilizado na produção das ortofotos no “*ERDAS Imagine*”.

Após o processamento dos dados do SLISA, foram obtidos os POE do sensor laser no momento da tomada das imagens (X'_0 , Y'_0 , Z'_0 , ω' , φ' , κ') e o MDT da área de estudos, totalizando aproximadamente 10 km². Com estes dados do SLISA e com a determinação do braço e do giro (ΔX_0 , ΔY_0 , ΔZ_0 , $\Delta \omega$, $\Delta \varphi$, $\Delta \kappa$), ver tópico 3.2.1, foi possível determinar os POE (X_0 , Y_0 , Z_0 , ω , φ , κ) das imagens aéreas. Estes POE entraram no processo de aerotriangulação como pontos de apoio para realizar um georreferenciamento direto das imagens aéreas sem a necessidade de levantar pontos de apoio.

O processamento da aerotriangulação e ortorretificação foi realizado no módulo de Fotogrametria “Leica Photogrammetry Suite” – LPS, do software “Erdas Imagine”, da fabricante “Leica Geosystems”.

Para realização do processo de aerotriangulação, além da entrada do POE de cada imagem também foi necessária a determinação dos pontos homólogos, classificando-os em pontos fotogramétricos de ligação e pontos fotogramétricos de verificação. Depois de determinados os pontos fotogramétricos manualmente, o programa automaticamente foi capaz de densificá-los, gerando pontos complementares que colaboraram no processo de aerotriangulação das fotografias aéreas. Após este, geraram-se as ortofotos de cada imagem e subsequentemente o mosaico para a área de estudo, sendo este resultado no sistema geodésico de referência SIRGAS2000 com projeção UTM.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta pesquisa, foram realizados três aerolevantamentos em datas distintas. Um para a determinação do giro ($\Delta\omega$, $\Delta\phi$, $\Delta\kappa$), ver tópico 3.2.1.5, e para o experimento (A) de produção de ortofotos pelo georreferenciamento indireto. E os outros dois para a realização de quatro experimentos (B, C, D, E) de produção de ortofotos pelo georreferenciamento direto (ver tabela 11).

TABELA 11 – Resumo dos Experimentos

	SLSA	CDPF	SLSA	CDPF	SLSA	CDPF
Data	24/10/2006		20/09/2007		07/05/2009	
Altura de VOO	1.000 m		1.000 m		1.000 m	
Tipo de Dados	SNI e MDT	Imagens	SNI e MDT	Imagens	SNI e MDT	Imagens
Utilização dos Dados	Determinação do Giro e Ortofotos por Georreferenciamento Indireto		Ortofotos por Georreferenciamento Direto		Ortofotos por Georreferenciamento Direto	
Experimento	A		B ⁽¹⁾ e C ⁽²⁾		D ⁽¹⁾ e E ⁽²⁾	
Resolução Espacial	23 cm		23 cm		23 cm	
Escala da Ortofoto	1/2.000		1/2.000		1/2.000	
Espaçamento do MDT	0,50 m		0,50 m		0,50 m	

⁽¹⁾ Sem pontos de apoio topográfico. ⁽²⁾ Com pontos de apoio topográfico.

4.1 DETERMINAÇÃO DO GIRO ENTRE SNI DO SLSA E CDPF

Para determinar o giro entre o SNI do SLSA e a CDPF, primeiramente temos que processar os dados do SLSA (tópico 3.2.1.2). Após processados os dados, foram extraídas as observações dos parâmetros de orientação exterior – POE (X'_0 , Y'_0 , Z'_0 , ω' , ϕ' , κ') do sensor laser no momento da tomada de cada imagem da CDPF que estão demonstrados na tabela 12. Cabe lembrar aqui que estas observações ainda não são as observações dos POE (X_0 , Y_0 , Z_0 , ω , ϕ , κ) das imagens da CDPF. Para melhor entendimento dos resultados, todos os POE que forem seguidos por uma linha (X'_0 , Y'_0 , Z'_0 , ω' , ϕ' , κ') estarão referenciados aos POE do sensor laser no momento da tomada das imagens da CDPF.

TABELA 12 – POE do SLSA no Momento da Tomada das Imagens Digitais

FOTO		POE – LASER					
		X'₀	Y'₀	Z'₀	ω'	φ'	κ'
01AXAIF	F_0029	679.556,414 m	7.189.191,464 m	1.924,415 m	-1,079 °	2,791 °	252,957 °
	F_0030	679.208,589 m	7.189.070,304 m	1.925,769 m	-0,458 °	2,070 °	252,047 °
	F_0031	678.862,683 m	7.188.943,196 m	1.926,153 m	-1,263 °	2,202 °	251,455 °
	F_0032	678.520,550 m	7.188.807,654 m	1.927,771 m	-1,413 °	2,295 °	252,098 °
	F_0033	678.179,732 m	7.188.669,273 m	1.929,180 m	0,999 °	1,854 °	252,227 °
	F_0034	677.832,548 m	7.188.543,170 m	1.929,245 m	0,898 °	1,658 °	253,137 °
	F_0035	677.479,642 m	7.188.420,975 m	1.927,201 m	2,107 °	1,684 °	252,486 °
	F_0036	677.122,873 m	7.188.300,027 m	1.924,679 m	-0,796 °	2,031 °	250,734 °
	F_0037	676.769,563 m	7.188.169,939 m	1.922,665 m	-0,959 °	2,141 °	250,110 °
	F_0038	676.419,060 m	7.188.032,415 m	1.921,671 m	-1,329 °	2,647 °	251,294 °
	F_0039	676.075,300 m	7.187.881,755 m	1.921,187 m	-1,911 °	2,661 °	247,351 °
02AXAIF	F_0040	675.735,052 m	7.187.999,312 m	1.930,884 m	-1,908 °	2,052 °	65,171 °
	F_0041	676.082,147 m	7.188.147,016 m	1.930,416 m	0,702 °	1,879 °	65,630 °
	F_0042	676.428,877 m	7.188.293,231 m	1.930,368 m	0,304 °	1,560 °	67,104 °
	F_0043	676.777,695 m	7.188.433,311 m	1.930,801 m	1,388 °	1,553 °	68,336 °
	F_0044	677.131,644 m	7.188.564,639 m	1.933,987 m	0,069 °	1,880 °	66,011 °
	F_0045	677.486,804 m	7.188.693,760 m	1.933,717 m	-1,545 °	1,380 °	66,819 °
	F_0046	677.844,946 m	7.188.825,054 m	1.927,713 m	0,862 °	1,361 °	66,538 °
	F_0047	678.203,931 m	7.188.957,310 m	1.925,512 m	-2,369 °	2,334 °	65,559 °
	F_0048	678.555,808 m	7.189.098,381 m	1.925,063 m	-0,842 °	2,086 °	64,395 °
	F_0049	678.903,070 m	7.189.244,125 m	1.924,609 m	0,441 °	2,343 °	64,375 °
	F_0050	679.249,010 m	7.189.388,633 m	1.927,132 m	-1,326 °	2,442 °	64,551 °
	F_0051	679.590,721 m	7.189.537,352 m	1.926,995 m	0,181 °	2,248 °	62,796 °

Após processado os dados POE do SLSA, foram determinado os centros perspectivos (X'_0 , Y'_0 e Z'_0) do sensor laser no momento da tomada das imagens. Com estes valores foram calculados os centros perspectivos (X_0 , Y_0 e Z_0) de cada imagem, utilizando as fórmulas 3.1, 3.2 e 3.3, cujos resultados estão na tabela 13.

TABELA 13 – Centros Perspectivos das Imagens da CDPF

TABELA 16 – Contorno e Perspectivas das imagens da CDF							
FOTO		LASER			FOTO		
		X'₀ (m)	Y'₀ (m)	Z'₀ (m)	X₀ (m)	Y₀ (m)	Z₀ (m)
01AXAIF	F_29	679556,414	7189191,464	1924,415	679556,399	7189191,648	1924,341
	F_30	679208,589	7189070,304	1925,769	679208,571	7189070,487	1925,695
	F_31	678862,683	7188943,196	1926,153	678862,663	7188943,379	1926,079
	F_32	678520,550	7188807,654	1927,771	678520,532	7188807,837	1927,697
	F_33	678179,732	7188669,273	1929,180	678179,714	7188669,456	1929,106
	F_34	677832,548	7188543,170	1929,245	677832,533	7188543,354	1929,171
	F_35	677479,642	7188420,975	1927,201	677479,625	7188421,158	1927,127
	F_36	677122,873	7188300,027	1924,679	677122,850	7188300,210	1924,605
	F_37	676769,563	7188169,939	1922,665	676769,538	7188170,122	1922,591
	F_38	676419,060	7188032,415	1921,671	676419,039	7188032,598	1921,597
	F_39	676075,300	7187881,755	1921,187	676075,267	7187881,936	1921,113

Continua na Página 86

Continuação da TABELA 13

FOTO		LASER			FOTO		
		X'₀ (m)	Y'₀ (m)	Z'₀ (m)	X₀ (m)	Y₀ (m)	Z₀ (m)
FAIXA 02	F_40	675735,052	7187999,312	1930,884	675735,092	7187999,132	1930,810
	F_41	676082,147	7188147,016	1930,416	676082,186	7188146,836	1930,342
	F_42	676428,877	7188293,231	1930,368	676428,911	7188293,050	1930,294
	F_43	676777,695	7188433,311	1930,801	676777,725	7188433,129	1930,727
	F_44	677131,644	7188564,639	1933,987	677131,682	7188564,459	1933,913
	F_45	677486,804	7188693,760	1933,717	677486,839	7188693,579	1933,643
	F_46	677844,946	7188825,054	1927,713	677844,982	7188824,873	1927,639
	F_47	678203,931	7188957,310	1925,512	678203,970	7188957,130	1925,438
	F_48	678555,808	7189098,381	1925,063	678555,851	7189098,202	1924,989
	F_49	678903,070	7189244,125	1924,609	678903,113	7189243,946	1924,535
	F_50	679249,010	7189388,633	1927,132	679249,052	7189388,454	1927,058
	F_51	679590,721	7189537,352	1926,995	679590,769	7189537,174	1926,921

Depois de determinadas as observações de X_0 , Y_0 e Z_0 das imagens da CDPF, foram atribuídos os desvios padrões para as observações na entrada da aerotriangulação (ver tabela 14).

TABELA 14 – Desvios Padrões Atribuídos às Observações na Aerotriangulação

	PESOS		
Desvio Padrão do Ponto Imagem	$\sigma = 0,330$ pixel		$\sigma = 0,330$ pixel
Desvio Padrão do Ponto de Apoio	$\sigma = 0,065$ m	$\sigma = 0,065$ m	$\sigma = 0,100$ m
Desvio Padrão dos X_0 , Y_0 e Z_0	$\sigma = 0,100$ m	$\sigma = 0,100$ m	$\sigma = 0,150$ m
Desvio Padrão dos POI	Fixo		

Os desvios padrões atribuídos aos valores X_0 , Y_0 e Z_0 vêm do processamento da trajetória da aeronave que é um processamento GNSS cinemático. Após atribuídos os desvios padrões foi realizada a aerotriangulação por bloco (tópico 3.2.1.4), para encontrar as rotação (ω , ϕ , κ) dos POE de cada imagem da CDPF. Os resultados desta aerotriangulação podem ser vistos nas tabelas 15, 16, 17 e 18.

TABELA 15 – Erro Médio Quadrático (RMSE) da Aerotriangulação

	Terreno			Imagem	
	X	Y	Z	x	y
RMSE nos Pontos de Apoio	0,1751 m	0,1500 m	0,2308 m	0,8673 pixel	0,7995 pixel
RMSE nos Pontos de Verificação	0,1485 m	0,2213 m	0,7910 m	0,6673 pixel	0,7816 pixel
RMSE Total na Imagem	0,3882 pixel				

TABELA 16 – Resíduos nos Pontos de Verificação

	X (m)	Y (m)	Z (m)
9	0,0978	0,0144	0,0444
11	0,0593	-0,0065	-0,1112
15	-0,1605	0,2226	-0,6107
23	-0,0056	-0,0237	0,5286
28	0,3060	-0,1698	-0,9746
29	0,0855	-0,0967	-0,9787
32	0,1734	0,2046	-0,9593
33	-0,0370	-0,2295	-0,7863
35	-0,0644	-0,4089	-1,1125
39	-0,2121	-0,3735	-0,9524
Média	0,0242	-0,0867	-0,5913
Desvio	0,1544	0,2146	0,5539

Ao analisar os resíduos dos pontos de verificação, identificamos que a aerotriangulação apresentou resultados dentro do esperado, já que o desvio padrão calculado é inferior a um sigma teórico, ou seja, sigma de 23 cm para as coordenadas X e Y, sendo este em função do tamanho do pixel da imagem no terreno, e sigma ($\sigma_{Z_{teórico}}$) de 59 cm para a coordenada Z, sendo este em função da altura média de VOO (H), distância média entre os centros perspectivos (B), distância focal (f) e tamanho do pixel no quadro da imagem, ver formula 4.1.

$$\sigma_{Z_{teórico}} = \pm \frac{H^2}{Bf} \cdot \delta \quad (4.1)$$

TABELA 17 – Resíduos nos Pontos de Apoio

	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	0,1237	0,0558	0,0049
2	0,0769	0,1591	0,0018
3	0,0634	0,1660	-0,0749
4	0,1460	0,1236	-0,0694
5	0,0774	0,0194	0,0350
6	0,0633	0,0763	0,0321
7	0,0819	0,0496	-0,1078
8	0,0617	0,0017	-0,0178
10	0,0578	0,0093	-0,0324
12	0,0701	0,0002	-0,0204
13	0,0229	-0,0363	-0,1322
14	0,0781	-0,1362	-0,0664

Continua na Página 88

Continuação da TABELA 17

	X (m)	Y (m)	Z (m)
16	-0,0220	-0,0976	-0,0783
17	-0,2250	0,1534	-0,3036
18	-0,2231	0,0919	-0,1403
19	-0,3324	0,1488	-0,0526
20	-0,0739	-0,0226	0,1644
21	-0,1492	0,1259	0,2967
22	-0,1030	0,0636	0,1760
24	-0,0644	0,1334	0,4007
25	0,1369	-0,0308	-0,0252
26	0,0824	-0,0361	-0,2489
27	0,0661	0,0178	-0,2776
30	0,0392	-0,1699	-0,0322
31	0,0397	-0,1723	-0,5040
34	-0,0049	-0,3090	-0,14
36	-0,0594	-0,0471	-0,1139
37	-0,1750	-0,2466	-0,4869
38	-0,2926	-0,1769	-0,4602
40	-0,1386	-0,1856	-0,6043
41	-0,2410	-0,0921	-0,2867
42	-0,2941	-0,2632	-0,1986
43	-0,3326	-0,1252	-0,1507
44	-0,1380	-0,4359	-0,2407
45	-0,3561	-0,0989	0,0387
46	-0,3257	-0,1788	0,1332
47	-0,3450	-0,1418	0,1758
Média	-0,0705	-0,0434	-0,0922
Desvio	0,1625	0,1455	0,2145

Ao analisar o desvio padrão dos pontos de apoio, observamos que a aerotriangulação apresentou resultados dentro do desvio padrão estipulado inicialmente para as observações dos pontos levantado por GNSS.

TABELA 18 – POE Determinados por Aerotriangulação

FOTO		POE – IMAGEM					
		X ₀	Y ₀	Z ₀	ω	φ	κ
FAIXA 01	F_29	679556,3990	7189191,6480	1924,3410	0,8728	3,3369	16,6804
	F_30	679208,5710	7189070,4870	1925,6950	0,4683	2,4516	17,6286
	F_31	678862,6630	7188943,3790	1926,0790	1,1742	2,8318	18,1770
	F_32	678520,5320	7188807,8370	1927,6970	1,2680	2,9341	17,5411
	F_33	678179,7140	7188669,4560	1929,1060	-0,8561	1,8348	17,4975
	F_34	677832,5330	7188543,3540	1929,1710	-0,6946	1,6690	16,5825
	F_35	677479,6250	7188421,1580	1927,1270	-1,8301	1,3424	17,2736
	F_36	677122,8500	7188300,2100	1924,6050	0,7323	2,5148	18,9420
	F_37	676769,5380	7188170,1220	1922,5910	0,8359	2,7013	19,5561
	F_38	676419,0390	7188032,5980	1921,5970	1,0585	3,2642	18,3489
	F_39	676075,2670	7187881,9360	1921,1130	1,3891	3,5745	22,2518

Continua na Página 89

Continuação da TABELA 18

FAIXA 02	F_40	675735,0920	7187999,1320	1930,8100	-1,4616	-3,0303	-155,5230
	F_41	676082,1860	7188146,8360	1930,3420	0,8443	-1,8473	-155,9193
	F_42	676428,9110	7188293,0500	1930,2940	0,2961	-1,7096	-157,4253
	F_43	676777,7250	7188433,1290	1930,7270	1,2961	-1,3335	-158,6158
	F_44	677131,6820	7188564,4590	1933,9130	0,2499	-2,0739	-156,3062
	F_45	677486,8390	7188693,5790	1933,6430	-1,5063	-2,2546	-157,1760
	F_46	677844,9820	7188824,8730	1927,6390	0,7250	-1,2969	-156,8275
	F_47	678203,9700	7188957,1300	1925,4380	-1,8230	-3,4670	-155,9611
	F_48	678555,8510	7189098,2020	1924,9890	-0,4614	-2,6439	-154,7413
	F_49	678903,1130	7189243,9460	1924,5350	0,7860	-2,3840	-154,6688
	F_50	679249,0520	7189388,4540	1927,0580	-0,7477	-3,2028	-154,9376
	F_51	679590,7690	7189537,1740	1926,9210	0,5488	-2,4110	-153,1143

Após realizado o processamento da aerotriangulação, foram determinadas as rotações (ω , ϕ , κ) dos POE das imagens. Com estes valores, foram calculadas os valores de giro ($\Delta\omega$, $\Delta\phi$, $\Delta\kappa$), utilizando as relações matemáticas da tabela 10 (ver tópico 3.2.1.5). Os resultados das diferenças encontradas entre o SNI do SLISA com a aerotriangulação podem ser verificados na tabela 19.

TABELA 19 – Valores de $\Delta\omega$, $\Delta\phi$, $\Delta\kappa$

TABELA 15 – valores de Δω, Δφ, Δκ										
FOTO		POE – IMAGEM			POE – LASER			Diferenças		
		ω °	φ °	κ °	ω' °	φ' °	κ' °	Δω °	Δφ °	Δκ °
FAIXA 01	F_0029	0,870	3,337	16,680	-1,079	2,791	252,957	-0,206	0,546	-0,363
	F_0030	0,468	2,452	17,629	-0,458	2,070	252,047	0,010	0,382	-0,324
	F_0031	1,174	2,832	18,177	-1,263	2,202	251,455	-0,089	0,630	-0,368
	F_0032	1,268	2,934	17,541	-1,413	2,295	252,098	-0,145	0,639	-0,361
	F_0033	-0,856	1,835	17,498	0,999	1,854	252,227	0,143	-0,019	-0,275
	F_0034	-0,695	1,669	16,583	0,898	1,658	253,137	0,203	0,011	-0,281
	F_0035	-1,830	1,342	17,274	2,107	1,684	252,486	0,277	-0,342	-0,240
	F_0036	0,732	2,515	18,942	-0,796	2,031	250,734	-0,064	0,484	-0,324
	F_0037	0,836	2,701	19,556	-0,959	2,141	250,110	-0,123	0,560	-0,334
	F_0038	1,059	3,264	18,349	-1,329	2,647	251,294	-0,271	0,617	-0,357
F_0039	1,389	3,575	22,252	-1,911	2,661	247,351	-0,522	0,914	-0,397	
FAIXA 02	F_0040	-1,462	-3,030	-155,523	-1,908	2,052	65,171	0,446	-0,978	-0,352
	F_0041	0,844	-1,847	-155,919	0,702	1,879	65,630	0,142	0,032	-0,289
	F_0042	0,296	-1,710	-157,425	0,304	1,560	67,104	-0,008	-0,150	-0,321
	F_0043	1,296	-1,334	-158,616	1,388	1,553	68,336	-0,092	0,220	-0,280
	F_0044	0,250	-2,074	-156,306	0,069	1,880	66,011	0,181	-0,194	-0,295
	F_0045	-1,506	-2,255	-157,176	-1,545	1,380	66,819	0,039	-0,875	-0,357
	F_0046	0,725	-1,297	-156,828	0,862	1,361	66,538	-0,137	0,064	-0,289
	F_0047	-1,823	-3,467	-155,961	-2,369	2,334	65,559	0,546	-1,133	-0,402
	F_0048	-0,461	-2,644	-154,741	-0,842	2,086	64,395	0,381	-0,558	-0,346
	F_0049	0,786	-2,384	-154,669	0,441	2,343	64,375	0,345	-0,041	-0,294
	F_0050	-0,748	-3,203	-154,938	-1,326	2,442	64,551	0,578	-0,761	-0,387
	F_0051	0,549	-2,411	-153,114	0,181	2,248	62,796	0,368	-0,163	-0,318

Como os valores de $\Delta\omega$ e $\Delta\phi$ da tabela 19 não seguiram um padrão como $\Delta\kappa$, optou-se em retirar do cálculo da média e do desvio padrão os valores divergentes da tendência do resultado. Por exemplo, os valores de $\Delta\omega$ da primeira faixa seguem uma tendência de serem valores negativos, logo todos os valores que eram positivos foram excluídos da determinação de $\Delta\omega$. Esta análise também foi realizada nos valores de $\Delta\omega$ da segunda faixa e de $\Delta\phi$ da primeira e segunda faixa. Depois destas análises, foi construída uma nova amostra de diferenças entre o SNI do SLISA com a Aerotriangulação (ver tabela 20). Com a relação matemática de ângulos (tabela 10) determinada, bem como a relação de sinais, optou-se aqui em determinar o giro só com valores em módulo, já que o sinal vem da relação matemática da tabela 10.

TABELA 20 – Determinação de $\Delta\omega$, $\Delta\phi$, $\Delta\kappa$

FOTO		Diferenças		
		$\Delta\omega^\circ$	$\Delta\phi^\circ$	$\Delta\kappa^\circ$
FAIXA 01	F_0029	0,206	0,546	0,363
	F_0030	-----	0,382	0,324
	F_0031	0,09	0,630	0,368
	F_0032	0,145	0,639	0,361
	F_0033	-----	-----	0,276
	F_0034	-----	0,011	0,281
	F_0035	-----	-----	0,240
	F_0036	0,064	0,484	0,324
	F_0037	0,123	0,560	0,334
	F_0038	0,271	0,617	0,357
	F_0039	0,522	0,914	0,397
FAIXA 02	F_0040	0,446	0,978	0,352
	F_0041	0,142	-----	0,289
	F_0042	-----	0,150	0,321
	F_0043	-----	-----	0,280
	F_0044	0,181	0,194	0,295
	F_0045	0,039	0,875	0,357
	F_0046	-----	-----	0,290
	F_0047	0,546	1,133	0,402
	F_0048	0,381	0,558	0,346
	F_0049	0,345	0,041	0,294
	F_0050	0,578	0,761	0,387
	F_0051	0,368	0,163	0,318
MÉDIA		0,278	0,535	0,329
DESVIO PADRÃO		0,180	0,329	0,043

Depois de calculados os valores médios de $\Delta\omega$, $\Delta\phi$ e $\Delta\kappa$, bem como a sua precisão, e juntos ΔX_0 , ΔY_0 e ΔZ_0 levantados por topografia (ver tópico 3.2.1.3) foi determinado o vetor $\Delta X_{\text{câmara}}$ (ver figura 43) que serão utilizados nos experimentos B,

C, D e E desta pesquisa para o georreferenciamento direto da imagens da CDPF. Este vetor pode ser visto na tabela 21.

TABELA 21 – Vetor $\Delta X_{\text{câmara}}$

	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	$\Delta \omega$ °	$\Delta \phi$ °	$\Delta \kappa$ °
$\Delta X_{\text{câmara}}$	-0,039	0,180	-0,074	0,278	0,535	0,329
σ	0,007	0,007	0,007	0,180	0,329	0,043

4.2 EXPERIMENTO A – PRODUÇÃO DE ORTOFOTOS NA ESCALA 1/2.000, COM PONTOS DE APOIO TOPOGRÁFICOS, DO VOO REALIZADO EM 24/10/2006 PELO GEORREFERENCIAMENTO INDIRETO

Neste experimento, foi realizado um georreferenciamento indireto, utilizando 13 pontos de apoio que é o recomendável pela Fotogrametria em uma aerotriangulação convencional. As observações utilizadas no experimento foram os dados do SLSA e da CDPF da determinação do giro (tópico 4.1).

Para a produção das ortofotos, primeiramente foram processados os dados do SLSA (tópico 3.2.1.2). Após processados os dados, foram extraídas as observações dos parâmetros de orientação exterior – POE do sensor laser no momento da tomada de cada imagem da CDPF (ver tabela 12).

Após processados os dados do SLSA, foram determinados os centros perspectivos (X'_0 , Y'_0 e Z'_0) do sensor laser no momento da tomada das imagens. Com estes valores, foram calculado os centros perspectivos (X_0 , Y_0 e Z_0) de cada imagem utilizado as formulas 3.1, 3.2 e 3.3, cujos resultados estão na tabela 13.

Depois de determinadas as observações de X_0 , Y_0 e Z_0 das imagens da CDPF, foram atribuídos os desvios padrões para as observações na entrada da aerotriangulação, ver tabela 14. Após atribuídos os estes foi realizado a aerotriangulação por bloco (tópico 3.2.1.4), para encontrar os POE de cada imagem da CDPF. Os resultados desta aerotriangulação podem ser observados nas tabelas 22, 23 e 24.

TABELA 22 – Erro Médio Quadrático (RMSE) da Aerotriangulação

	Terreno			Imagem	
	X	Y	Z	x	y
RMSE nos Pontos de Apoio	0,2810 m	0,1358 m	0,2084 m	1,1130 pixel	1,0933 pixel
RMSE nos Pontos de Verificação	0,3853 m	0,3874 m	1,2665 m	0,7177 pixel	0,8339 pixel
RMSE Total na Imagem	0,3888 pixel				

TABELA 23 – Resíduos nos Pontos de Verificação

	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	0,4322	0,1625	-0,4908
2	0,3832	0,6824	-1,1691
3	0,3327	0,4787	-0,9194
4	0,3970	0,3413	-0,6931
8	0,2345	0,0455	-0,4811
9	0,1830	0,1422	-0,3058
10	0,1344	0,2645	-0,4063
14	0,2121	-0,3056	-0,6083
15	-0,1309	0,3310	-0,7939
16	0,0449	-0,2166	-0,5387
17	-0,2554	0,3448	-0,7312
18	-0,2074	0,2073	-0,4319
19	-0,4113	0,3524	-0,4141
20	-0,0130	0,0030	0,2345
25	0,2534	-0,1690	-0,7559
26	0,1013	-0,0608	-1,1243
27	-0,0122	0,1234	-1,1545
28	0,2882	-0,1643	-1,6199
29	-0,0114	-0,0634	-1,5871
30	-0,0087	-0,5995	-1,4762
31	-0,1238	-0,1753	-1,5868
32	-0,0488	0,4840	-1,6794
33	-0,1910	-0,2742	-1,4567
34	-0,0404	-0,8742	-1,5314
35	-0,2137	-0,5094	-1,8168
36	-0,4783	0,4272	-1,6569
37	-0,3903	-0,4451	-1,6035
38	-0,6635	-0,0667	-1,4209
39	-0,4177	-0,4535	-1,5989
40	-0,5777	-0,0335	-2,0452
41	-0,6418	-0,1380	-1,3969
42	-0,6816	-0,8022	-1,7565
43	-1,0135	0,2036	-1,8473
44	-0,7096	-0,7345	-1,6606
Média	-0,1249	-0,0439	-1,1331
Desvio	0,3699	0,3907	0,5744

Ao analisar os resíduos dos pontos de verificação, identificamos que a aerotriangulação apresentou resultados de desvio padrão dentro do esperado, já que o desvio calculado é inferior a um sigma teórico, ou seja, sigma de 23 cm, para as coordenadas X e Y e sigma de 59 cm para a coordenada Z, mais informações ver tópico 4.1. Porém, se for observada a média da coordenada Z, encontraremos uma tendência no resultado, ou seja, um erro sistemático no processamento da aerotriangulação. Este erro sistemático pode vir de dois fatores, o primeiro pode ser de uma má calibração dos parâmetros de orientação interior – POI da CDPF, e o segundo fator pode ser da falta de precisão na determinação dos POE do SNI.

TABELA 24 – Resíduos nos Pontos de Apoio

	X (m)	Y (m)	Z (m)
5	0,1607	0,1242	0,0156
6	0,1975	0,1459	-0,1703
7	0,2405	0,0395	-0,2590
11	0,1119	0,0786	-0,2679
12	0,1459	0,0717	-0,2073
13	0,0476	0,1162	-0,2171
21	-0,1016	0,2002	0,1599
22	-0,0717	0,0737	0,0481
23	-0,0053	0,1282	0,0660
24	-0,0646	0,2396	0,4016
45	-0,5395	-0,0990	0,0460
46	-0,5168	-0,1722	0,1973
47	-0,5382	-0,1331	0,2677
Média	-0,0718	0,0626	0,0062
Desvio	0,2827	0,1254	0,2168

Ao analisar o desvio padrão dos pontos de apoio, observamos que a aerotriangulação apresentou resultados acima do desvio padrão estipulado inicialmente para as observações dos pontos levantado por GNSS. Aqui novamente o problema pode estar na calibração da CDPF ou nos POE do SNI do SLISA.

Após realizada a aerotriangulação, foram geradas as ortofotos das imagens que serviram na confecção do mosaico da área de estudos. Para verificação das ortofotos geradas pelo georeferenciamento indireto utilizando 13 pontos de apoio, foram realizadas análises estatísticas das diferenças encontradas entre o levantamento de campo e a ortofotos (tabela 25). As análises foram realizadas pelos testes de tendência e de precisão, como base a tabela do PEC (tabela 27).

TABELA 25 – Diferença entre o Levantamento de Campo (GPS) e a Ortofotos

APOIO	Diferenças	
	ΔE (m)	ΔN (m)
1	-0,0431	-0,3071
2	-0,4558	-0,3606
3	-0,0047	-0,4062
4	0,0089	-0,2803
5	-0,0900	-0,1142
6	-0,3109	-0,0165
7	-0,4106	0,1258
8	0,0535	-0,0074
9	0,0336	0,0017
10	0,0861	-0,1435
11	0,0876	-0,0429
12	-0,2640	0,0465
13	0,1093	-0,0421
14	-0,2801	0,2783
15	0,3288	-0,5270
16	0,1069	0,1441
17	0,2485	-0,4013
18	0,2446	-0,2587
19	0,3176	-0,4211
20	-0,0776	0,1496
21	-0,0779	0,0366
22	-0,0884	-0,2833
23	0,5811	-0,5928
24	-0,3281	-0,4276
25	-0,1153	0,2674
26	-0,0841	0,1907
27	0,0176	-0,1513
28	-0,1052	0,1576
29	0,0144	-0,0815
30	0,2369	0,7341
31	-0,0411	0,0139
32	0,0099	-0,1472
33	0,1151	0,7864
34	0,1619	0,8285
35	0,1661	0,6870
36	0,2873	-0,0367
37	0,1649	0,7116
38	0,0999	-0,0077
39	0,2845	0,3960
40	0,3107	0,0770
41	0,4576	0,0744
42	0,4977	0,5156
43	0,4277	0,0552
44	0,4377	0,0477
45	0,8609	0,0568
46	0,9249	-0,0412
47	0,9042	-0,0983
Média	0,1236	0,0252
Desvio	0,3111	0,3418

No teste de tendência, foi levado em conta o erro médio ($\varepsilon_{\Delta N}$, $\varepsilon_{\Delta E}$) e o desvio padrão ($S_{\Delta N}$, $S_{\Delta E}$) da tabela 25 para avaliar as diferenças encontradas e se estas são ou não tendenciosas.

Para hipótese H_0 , o erro médio observado ($\varepsilon_{\Delta N}$, $\varepsilon_{\Delta E}$) é igual a zero, ou seja, não é tendencioso e, para hipótese H_1 , o erro médio observado ($\varepsilon_{\Delta N}$, $\varepsilon_{\Delta E}$) é diferente de zero, ou seja, é tendencioso.

$$\begin{array}{ll} H_0: \varepsilon_{\Delta N} = 0 & H_1: \varepsilon_{\Delta N} \neq 0 \\ H_0: \varepsilon_{\Delta E} = 0, \text{ contra} & H_1: \varepsilon_{\Delta E} \neq 0 \end{array}$$

Para realizar este teste, utilizou-se a distribuição de *Student* (t), com um nível de confiança de 90% e o número total de observações (n). Com a tabela da distribuição de *Student* (t), localizou-se o valor limite (t) que para a amostra observada de 47 pontos era de 1,30. Observando o limite t , calculou-se a tendência para cada eixo observado (N , E) pelas formulas abaixo descritas:

$$t_N = \frac{\varepsilon_{\Delta N}}{S_{\Delta N}} \cdot \sqrt{n} \quad (4.2)$$

$$t_E = \frac{\varepsilon_{\Delta E}}{S_{\Delta E}} \cdot \sqrt{n} \quad (4.3)$$

Os valores resultantes do teste de tendência (tabela 26) foram comparados com o valor limite t para definir se há tendência nos eixos, logo se t_N e t_E for menor que 1,30 não existe tendência nos eixos, ou seja, a base cartográfica está livre de erros sistemáticos. Caso contrário, a base cartográfica está composta de erros sistemáticos.

TABELA 26 – Análise de tendência

	t_E	t_N
Limite t_{47} a 90%	1,30	1,30
Valor t calculado	2,72	0,51
Tendência	Sim	Não

No teste de precisão, a hipótese levada em conta é o desvio padrão ($\sigma_{\Delta N}$, $\sigma_{\Delta E}$), da tabela 27, do Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC do decreto-lei 89.817 e o desvio padrão ($S_{\Delta N}$, $S_{\Delta E}$) da tabela 25, para avaliar as diferenças encontradas e se

são ou não precisas. Já o PEC utilizado como base nos testes de tendência e precisão é um indicador estatístico de dispersão relativa a uma probabilidade de 90%, ou seja, correspondente a uma probabilidade de 1,6449 vezes o desvio padrão observado ($S_{\Delta N}$, $S_{\Delta E}$).

TABELA 27 – Valores planimétricos do desvio padrão e PEC obtidos do decreto-lei 89.817

ESCALA	PLANIMETRIA (m)					
	CLASSE – A		CLASSE – B		CLASSE – C	
	$\sigma_{\Delta N}$ e $\sigma_{\Delta E}$	PEC	$\sigma_{\Delta N}$ e $\sigma_{\Delta E}$	PEC	$\sigma_{\Delta N}$ e $\sigma_{\Delta E}$	PEC
1/1.000	0,30	0,50	0,50	0,80	0,60	1,00
1/2.000	0,60	1,00	1,00	1,60	1,20	2,00
1/3.000	0,90	1,50	1,50	2,40	1,80	3,00
1/4.000	1,20	2,00	2,00	3,20	2,40	4,00
1/5.000	1,50	2,50	2,50	4,00	3,00	5,00
1/10.000	3,00	5,00	5,00	8,00	6,00	10,00

Para hipótese H_0 , o desvio padrão calculado ($S_{\Delta N}$, $S_{\Delta E}$) é igual ao desvio padrão do decreto-lei ($\sigma_{\Delta N}$, $\sigma_{\Delta E}$), ou seja, o mapeamento atende à precisão pré-estabelecida no decreto-lei 89.817 e, para hipótese H_1 , o desvio padrão calculado ($S_{\Delta N}$, $S_{\Delta E}$) é diferente do desvio padrão do decreto-lei ($\sigma_{\Delta N}$, $\sigma_{\Delta E}$), ou seja, o mapeamento não atende à precisão pré-estabelecida no decreto-lei 89.817.

$$H_0: S_{\Delta N} = \sigma_{\Delta N}$$

$$H_1: S_{\Delta N} \neq \sigma_{\Delta N}$$

$$H_0: S_{\Delta E} = \sigma_{\Delta E}, \text{ contra}$$

$$H_1: S_{\Delta E} \neq \sigma_{\Delta E}$$

Para realizar este teste, utilizou-se a distribuição CHI-Quadrado, com um nível de confiança de 90% e o número total de observações (n). Com a tabela da distribuição CHI-Quadrado, localizou-se o valor limite (X^2) que para a amostra observada de 47 pontos era de 59,78. Com o limite X^2 definido, foi calculada a precisão do mapeamento em diversas escalas e para cada eixo observado (N, E), usando as fórmulas abaixo descritas:

$$X_N^2 = (n - 1) \cdot \left(\frac{S_{\Delta N} \cdot \sqrt{2}}{\sigma_N} \right) \quad (4.4)$$

$$X_E^2 = (n - 1) \cdot \left(\frac{S_{\Delta E} \cdot \sqrt{2}}{\sigma_E} \right) \quad (4.5)$$

Os valores resultantes foram comparados com o valor limite X^2 para definir se o mapeamento atende à precisão pré-estabelecida no decreto-lei 89.817 para os eixos. Logo, se X^2 for menor que 59,78, o mapeamento atende à precisão pré-estabelecida no decreto-lei 89.817 para a escala avaliada, caso contrário, o mapeamento não atende à precisão (ver tabela 28).

TABELA 28 – Análise de Precisão Planimétrica (Classe A)

ESCALA	PRECISÃO	(Este)	(Norte)
1/1.000	Não	98,92	119,44
1/2.000	Sim	24,73	29,86
1/3.000	Sim	10,99	13,27
1/4.000	Sim	6,18	7,46
1/5.000	Sim	3,96	4,78
1/10.000	Sim	0,99	1,19

Para o experimento A, podemos concluir que os resultados encontrados na avaliação estatística foram melhores do que o esperado para a escala 1/2.000, visto que o valor chi-quadrado permitido era de 59,78 e os valores encontrados foram 24,73 para o eixo leste e 29,86 para o eixo norte, abaixo do permitido. Isto nos leva a concluir que estas ortofotos atenderiam à exatidão da escala 1/1.500, podendo assim classificá-la como classe A pelo decreto 89.817/84. Porém, na análise de tendência foram encontrados valores tendenciosos no eixo leste. Como visto na análise da aerotriangulação, ainda existem erros sistemáticos nos dados. Isto nos leva a concluir que ainda devemos estudá-los mais detalhadamente.

4.3 EXPERIMENTO B – PRODUÇÃO DE ORTOFOTOS NA ESCALA 1/2.000, SEM PONTOS DE APOIO TOPOGRÁFICOS, DO VOO REALIZADO EM 20/09/2007

Primeiramente, temos que processar os dados do SLISA (tópico 3.2.2), após processados os dados foram extraídos os valores dos POE (X'_0 , Y'_0 , Z'_0 , ω' , φ' , κ') do sensor laser no momento da tomada de cada imagem da CDPF que estão demonstrados na tabela 29.

TABELA 29 – POE do SLISA no Momento da Tomada das Imagens Digitais

FOTO		POE – LASER					
		X ₀ (m)	Y ₀ (m)	Z ₀ (m)	ω' °	φ' °	κ' °
FAIXA 01	F_0019	676101,690	7187683,689	1888,206	-2,189	1,313	60,818
	F_0020	676458,095	7187812,821	1881,398	-2,992	1,803	58,440
	F_0021	676812,480	7187953,204	1879,404	-0,165	2,526	58,998
	F_0022	677163,673	7188092,959	1879,834	-0,927	2,906	61,353
	F_0023	677513,755	7188227,611	1885,628	1,465	2,251	61,074
	F_0024	677864,816	7188360,723	1887,082	-1,326	2,388	62,081
	F_0025	678216,952	7188496,909	1888,293	-3,331	1,660	61,226
	F_0026	678569,580	7188638,467	1885,120	-0,749	2,016	61,705
	F_0027	678931,680	7188770,858	1880,997	5,515	1,810	61,589
	F_0028	679305,678	7188881,536	1876,799	-1,588	2,642	63,021
	F_0029	679676,247	7188990,320	1876,191	-2,026	2,395	60,091
FAIXA 02	F_0035	679528,434	7189432,759	1869,686	-1,079	2,552	257,206
	F_0036	679163,640	7189292,216	1861,962	-1,931	3,469	257,515
	F_0037	678807,876	7189138,337	1862,854	-5,505	3,510	253,929
	F_0038	678463,442	7188966,856	1865,644	5,847	2,127	259,688
	F_0039	678114,980	7188826,376	1864,338	3,145	2,564	266,060
	F_0040	677763,749	7188715,878	1868,249	1,534	3,848	262,919
	F_0041	677416,525	7188608,348	1867,263	-2,432	2,566	257,630
	F_0042	677071,255	7188481,532	1862,859	-3,911	3,604	257,413
	F_0043	676729,892	7188337,110	1861,377	4,313	3,363	259,551
	F_0044	676385,550	7188214,596	1864,141	1,628	3,584	263,602
	F_0045	676039,425	7188107,400	1864,300	-3,283	3,637	263,580

Após processados os parâmetros de orientação exterior do sensor laser no momento da tomada das imagens, foram calculados os parâmetros de orientação exterior de cada imagem, utilizando as fórmulas 3.1, 3.2 e 3.3 e as tabelas 10 e 21. Estes resultados podem ser encontrados na tabela 30.

TABELA 30 – POE das Imagens da CDPF

FOTO		POE – IMAGEM					
		X ₀ (m)	Y ₀ (m)	Z ₀ (m)	ω °	φ °	κ °
FAIXA 01	F_0019	676101,744	7187683,513	1888,132	-1,911	-1,848	-151,147
	F_0020	676458,156	7187812,647	1881,324	-2,714	-2,338	-148,769
	F_0021	676812,539	7187953,030	1879,330	0,113	-3,061	-149,327
	F_0022	677163,725	7188092,782	1879,760	-0,649	-3,441	-151,682
	F_0023	677513,808	7188227,435	1885,554	1,743	-2,786	-151,403
	F_0024	677864,866	7188360,546	1887,008	-1,048	-2,923	-152,410
	F_0025	678217,004	7188496,732	1888,219	-3,053	-2,195	-151,555
	F_0026	678569,631	7188638,290	1885,046	-0,471	-2,551	-152,034
	F_0027	678931,731	7188770,681	1880,923	5,793	-2,345	-151,918
	F_0028	679305,725	7188881,358	1876,725	-1,310	-3,177	-153,350
	F_0029	679676,303	7188990,145	1876,117	-1,748	-2,930	-150,420

Continua na Página 99

Continuação da TABELA 30

FOTO		POE – IMAGEM					
		X ₀ (m)	Y ₀ (m)	Z ₀ (m)	ω °	φ °	κ °
FAIXA 02	F_0035	679528,432	7189432,943	1869,612	0,801	3,087	12,466
	F_0036	679163,639	7189292,400	1861,888	1,653	4,004	12,157
	F_0037	678807,864	7189138,521	1862,780	5,227	4,045	15,743
	F_0038	678463,448	7188967,040	1865,570	-6,125	2,662	9,984
	F_0039	678115,007	7188826,558	1864,264	-3,423	3,099	3,612
	F_0040	677763,766	7188716,061	1868,175	-1,812	4,383	6,753
	F_0041	677416,525	7188608,532	1867,189	2,154	3,101	12,042
	F_0042	677071,254	7188481,716	1862,785	3,633	4,139	12,259
	F_0043	676729,898	7188337,294	1861,303	-4,591	3,898	10,121
	F_0044	676385,569	7188214,779	1864,067	-1,906	4,119	6,070
	F_0045	676039,444	7188107,583	1864,226	3,005	4,172	6,092

Depois de determinados os POE, foram atribuídos os desvios padrões para observações de entrada na aerotriangulação (ver tabela 31).

TABELA 31 – Desvios Padrões Atribuídos às Observações na Aerotriangulação

	PESOS					
Desvio Padrão do Ponto Imagem	0,330 pixel			0,330 pixel		
Desvio Padrão do Ponto de Apoio	0,065 m		0,065 m		0,100 m	
Desvio Padrão dos X ₀ , Y ₀ , Z ₀ , ω, φ, κ	0,10 m	0,10 m	0,15 m	0,180°	0,329°	0,043°
Desvio Padrão dos POI	Fixo					

Após atribuídos os desvios padrões, foi realizada a aerotriangulação por bloco (tópico 3.2.2), para a produção de ortofotos. Os resultados desta aerotriangulação podem ser vistos nas tabelas 32 e 33.

TABELA 32 – Erro Médio Quadrático (RMSE) da Aerotriangulação

	Terreno			Imagem	
	X	Y	Z	x	y
RMSE nos Pontos de Verificação	1,4326 m	1,5248 m	3,0512 m	0,3242 pixel	1,4269 pixel
RMSE Total na Imagem	0,5343 pixel				

TABELA 33 – Resíduos nos Pontos de Verificação

	X (m)	Y (m)	Z (m)
55	0,6312	-0,8018	2,6346
56	0,2125	-1,1869	2,0584
57	0,0381	-1,3545	3,4497
58	0,8785	0,0274	3,9805
59	0,8266	-0,5500	4,5751
60	1,9465	0,8338	4,8757

Continua na Página 100

Continuação da TABELA 33

	X (m)	Y (m)	Z (m)
61	0,8930	-1,2794	3,4874
62	1,5274	-0,2965	4,0399
63	1,8497	0,0121	4,2784
64	1,2207	-0,9027	2,8717
65	1,5778	-0,4556	3,2893
66	1,7803	-0,5646	3,8378
67	2,2532	0,6964	4,7276
68	1,7503	-0,9242	3,1234
69	2,1083	-0,7001	4,0700
70	1,6883	-1,4353	2,7853
71	1,2438	-1,7008	2,5576
72	1,6219	-1,6268	2,2909
73	1,5901	-1,7802	2,3306
74	2,3185	0,5518	5,1311
75	2,3602	-1,6259	4,0327
76	2,9879	-0,8598	4,9672
78	-0,9570	-2,7041	-0,7140
79	0,7126	-1,8514	2,6707
80	-0,1867	-2,0270	1,9301
81	-1,5566	-3,1728	1,3776
82	-1,4960	-3,1038	1,0772
83	0,6703	-1,7463	2,4649
84	-0,3111	-1,6082	-0,1211
85	0,0843	-1,8443	2,4708
86	-1,1408	-1,7444	-0,4051
87	-0,0315	-1,9481	3,7113
88	-0,2478	-1,9453	3,6844
89	-1,1959	-1,9693	1,3129
90	-0,7683	-1,7944	1,3143
91	-0,4602	-1,5307	2,5313
92	-2,3875	-1,6761	0,8679
93	-0,8956	-1,2035	1,4283
94	-1,9786	-0,9240	-0,6699
Média	0,5425	-1,2492	2,6751
Desvio	1,3632	0,9197	1,5668

Ao verificar os resíduos dos pontos de verificação, analisamos que a aerotriangulação apresentou resultados de desvio padrão fora do esperado, uma vez que o desvio calculado é superior a um sigma teórico de 23 cm para as coordenadas X e Y e de 59 cm para a coordenada Z, mais informações sobre sigma teórico ver tópico 4.1. Outro resultado observado foi a média das coordenadas X, Y e Z, onde encontramos grandes tendências, ou seja, existem erros sistemáticos no processo da aerotriangulação. Este erro, como comentado no tópico 4.1, pode ser de uma má calibração dos parâmetros de orientação interior – POI da CDPF, ou de uma falta de precisão na determinação dos POE do SNI.

Depois de processada a aerotriangulação, foram geradas as ortofotos para análise da exatidão do georreferenciamento direto, ou seja, sem pontos de apoio. As análises estatísticas foram realizadas nas diferenças encontradas entre o levantamento de campo e a ortofotos (tabela 34). Estas análises foram efetuadas pelos testes de tendência e de precisão, usando como base a tabela do padrão de exatidão cartográfica – PEC (tabela 27).

TABELA 34 – Diferença entre o Levantamento de Campo (GPS) e a Ortofotos

APOIO	Diferenças	
	ΔE (m)	ΔN (m)
1	0,1114	0,7453
2	1,8405	0,3859
3	0,9960	0,4165
4	0,0620	0,6260
5	2,6154	0,7500
6	0,6733	1,2024
7	-0,2734	0,3230
8	-0,0659	0,0746
9	1,0588	1,5221
10	1,8350	1,5294
11	1,5222	1,7073
12	-0,3908	1,4132
13	0,0150	2,4159
14	-0,6674	0,2822
15	0,6168	1,4726
16	-0,6235	0,2726
17	0,9787	1,5904
18	-1,0245	1,1752
19	0,2616	1,1892
20	-1,5505	0,2384
21	-0,4395	0,1461
22	-0,9878	-0,1578
23	0,2772	1,3925
24	0,9746	1,5439
25	-1,8681	-0,1968
26	-0,7154	1,3485
27	1,0572	0,8681
28	-0,7732	1,2556
29	0,1835	1,9159
30	-2,3678	0,5203
31	-0,5965	1,8679
32	1,3266	2,0294
33	-0,8683	2,0030
34	-2,1445	0,6634
35	-1,4619	2,0943
36	1,9756	2,4522

Continua na Página 102

Continuação da TABELA 34

APOIO	Diferenças	
	ΔE (m)	ΔN (m)
37	-1,2437	2,5577
38	0,6402	2,1394
39	-1,0384	2,3651
40	0,2868	2,3571
41	-0,5881	2,0188
42	-2,1436	1,6167
43	0,9306	2,5006
44	-0,6948	2,4755
45	-1,0723	2,4563
46	0,2919	1,7259
47	0,5485	3,2752
Média	-0,0536	1,3738
Desvio	1,1637	0,8576

Seguindo os mesmos passos do teste de tendência do experimento A, utilizou-se a distribuição de *Student* (t), com um nível de confiança de 90% e o número total de observações (n). Na tabela da distribuição de *Student* (t), localizou-se o valor limite (t) que para a amostra observada de 47 pontos era de 1,30.

Observando o limite t , calculou-se a tendência para cada eixo observado (N , E) pelas fórmulas 4.2 e 4.3. Estes valores resultantes (tabela 35) foram comparados com o valor limite t para definir se há erros sistemáticos nas ortofotos.

TABELA 35 – Análise de tendência

	t_N	t_E
Limite t_{47} a 90%	1,30	1,30
Valor t calculado	0,32	10,98
Tendência	Não	sim

Seguindo os mesmos passos do teste de tendência do experimento A, utilizou-se a distribuição CHI-Quadrado, com um nível de confiança de 90% e o número total de observações (n). Na tabela da distribuição CHI-Quadrado, localizou-se o valor limite (X^2) que para a amostra observada de 47 pontos era de 59,78.

Com o limite X^2 definido, foi calculada a precisão das ortofotos nas diversas escalas e ainda para cada eixo observado (N , E), usando as fórmulas 4.4 e 4.5. Os valores resultantes foram comparados com o valor limite X^2 para definir se as ortofotos atendem a precisão estabelecida no decreto-lei 89.817 para os eixos (ver tabela 36).

TABELA 36 – Análise de Precisão Planimétrica (Classe A)

ESCALA	PRECISÃO	(Norte)	(Este)
1/1.000	Não	1384,23	751,80
1/2.000	Não	346,06	187,95
1/3.000	Não	153,80	83,53
1/4.000	Não	86,51	46,99
1/5.000	Sim	55,37	30,07
1/10.000	Sim	13,84	7,52

Para o experimento B, podemos verificar que os resultados obtidos na análise estatística foram superiores ao esperado para a escala 1/2.000, onde o valor chi-quadrado permitido era de 59,78 e os valores encontrados foram 346,06 para o eixo norte e 187,95 para o eixo leste, bem superior ao permitido. Isto no leva a observar que estas ortofotos atenderiam à exatidão da escala 1/5.000 como classe A pelo decreto 89.817/84. Na análise de tendência, foram verificados valores tendenciosos desta vez no eixo leste. Como identificado na análise da aerotriangulação, ainda existem erros sistemáticos nos dados. Isto nos leva a concluir que ainda devemos estudá-los mais aprofundadamente.

4.4 EXPERIMENTO C – PRODUÇÃO DE ORTOFOTOS NA ESCALA 1/2.000, COM PONTOS DE APOIO TOPOGRÁFICOS DO VOO REALIZADO EM 20/09/2007

Utilizando o processamento do SLISA do experimento B, foram extraídos os POE (X'_0 , Y'_0 , Z'_0 , ω' , φ' , κ') do sensor laser no momento da tomada das imagem da CDPF (ver tabela 29). Após processados os POE do sensor laser, foram calculados os POE (X_0 , Y_0 , Z_0 , ω , φ , κ) de cada imagem, utilizando as fórmulas 3.1, 3.2 e 3.3 e as tabelas 10 e 21. Estes resultados podem ser encontrados na tabela 30. Depois de determinado os POE da CDPF, foram atribuídos os desvios padrões para as observações de entrada na aerotriangulação (ver tabela 31).

Após atribuídos os pesos, foram inseridos os quatro pontos de apoio nos cantos do bloco para auxiliar o processo da aerotriangulação. Depois de inserido o apoio, foi realizada a aerotriangulação (tópico 3.2.2), para a produção de ortofotos. Os resultados desta aerotriangulação podem ser vistos nas tabelas 37 e 38.

TABELA 37 – Erro Médio Quadrático (RMSE) da Aerotriangulação

	Terreno			Imagem	
	X	Y	Z	x	y
RMSE nos Pontos de Apoio	0,0136 m	0,0129 m	0,0351 m	0,1983 pixel	0,1955 pixel
RMSE nos Pontos de Verificação	0,3724 m	0,4988 m	0,9991 m	0,3149 pixel	0,2603 pixel
RMSE Total na Imagem	0,3231 pixel				

TABELA 38 – Resíduos nos Pontos de Verificação

	X (m)	Y (m)	Z (m)
56	0,2949	0,0825	0,4892
57	0,1859	0,0563	1,0821
58	-0,1735	0,3496	1,3992
59	0,0944	0,3882	1,4921
60	0,1776	0,9460	1,5890
61	0,4937	0,3891	1,8453
62	0,3108	0,5944	1,3381
63	0,3299	0,7198	1,5055
64	0,5283	0,6749	1,1698
65	0,6680	0,9511	0,6949
66	0,5803	0,7284	0,8864
67	0,3746	0,9297	1,1443
68	0,2301	0,6418	0,7212
69	0,2484	0,4673	1,1108
70	0,1983	0,5012	0,6820
71	0,2053	0,4825	0,6636
72	0,1577	0,4642	0,3231
73	0,1284	0,3698	0,4359
74	0,2596	0,9335	1,8017
75	0,0774	0,2220	0,5275
79	0,2727	0,4686	0,8107
80	-0,0984	0,6506	0,3126
81	-0,0505	-0,2138	0,4206
82	-0,0215	-0,3868	0,6330
83	0,2182	0,4808	0,4651
84	0,7350	0,4681	0,1270
85	0,7647	0,0590	1,4203
86	0,7436	0,3710	0,1707
87	0,5208	-0,0462	1,5978
88	0,4953	0,0689	0,6731
89	0,3539	-0,1939	0,9296
90	0,5023	-0,1556	1,1045
91	0,3157	-0,2519	0,6034
92	0,1613	-0,2031	0,7847
93	0,0829	-0,1084	0,4992
Média	0,2962	0,3400	0,8987
Desvio	0,2379	0,3801	0,4749

Ao calcular os resíduos dos pontos de verificação, analisamos que a aerotriangulação apresentou um resultados distintos, em que o desvio do eixo X está aproximadamente igual a um sigma teórico de 23 cm. Já o eixo Y tem um valor

superior ao sigma teórico. Isto aconteceu devido a algum problema na leitura dos pontos fotogramétricos. Porém, o desvio padrão do eixo Z está bem abaixo do sigma teórico, que era de 59 cm, atendendo às expectativas da aerotriangulação. Mais informações sobre sigma teórico ver tópico 4.1. Outro resultado analisado foi a média das coordenadas X, Y e Z. Nestas encontramos valores tendenciosos, ou seja, existem erros sistemáticos no processamento da aerotriangulação. Este erro, como comentado no tópico 4.1, pode ser oriundo de uma má calibração dos POI da CDPF ou de uma falta de precisão na determinação dos POE do SNI.

Depois de processada a aerotriangulação, foram geradas as ortofotos para análise da exatidão do georreferenciamento direto com quatro pontos de apoio. Estas análises estatísticas estão nas diferenças encontradas entre o levantamento de campo e a ortofotos (tabela 39). As análises foram realizadas pelos testes de tendência e de precisão, usando como base a tabela do padrão de exatidão cartográfica – PEC (tabela 27).

TABELA 39 – Diferença entre o Levantamento de Campo (GPS) e as Ortofotos

APOIO	Diferenças	
	ΔE (m)	ΔN (m)
1	0,0180	0,1200
2	0,0735	-0,0837
3	-0,0162	0,0067
4	-0,0471	-0,1071
5	0,3314	-0,0446
6	-0,1407	0,3291
7	0,0313	-0,0747
8	-0,2083	-0,3024
9	-0,4059	0,0579
10	-0,1675	-0,0842
11	-0,1764	0,1668
12	-0,3432	0,2628
13	0,4669	-0,0907
14	-0,1160	-0,1599
15	-0,4299	-0,1559
16	0,0002	-0,3145
17	-0,2587	-0,0828
18	-0,0173	0,0104
19	-0,6579	-0,3212
20	-0,2379	-0,4246
21	-0,2152	-0,8219
22	-0,1076	-0,7221
23	-0,5029	-0,4676
24	-0,6006	-0,5492

Continua na Página 106

Continuação da TABELA 39

APOIO	Diferenças	
	ΔE (m)	ΔN (m)
25	-0,5074	-0,8309
26	-0,1047	-0,1141
27	0,0266	-0,1431
28	-0,2766	-0,5220
29	0,1024	-0,4159
30	-0,2902	-0,6638
31	-0,3353	-0,4533
32	-0,0757	-0,1094
33	-0,0945	-0,4084
34	-0,1691	-0,2944
35	-0,0222	-0,5464
36	0,1621	-0,0635
37	-0,2043	-0,2489
38	0,1215	-0,2011
39	-0,1679	-0,2034
40	0,1335	-0,0502
41	0,0832	-0,3110
42	-0,0923	-0,2605
43	0,0911	-0,0156
44	-0,1951	-0,0061
45	0,6232	0,2736
46	-0,0082	0,0636
47	-0,1006	-0,4499
Média	-0,1070	-0,2091
Desvio	0,2474	0,2732

Seguindo os mesmos passos do teste de tendência do experimento A, utilizou-se a distribuição de *Student* (t), com um nível de confiança de 90% e o número total de observações (n). Na tabela da distribuição de *Student* (t), localizou-se o valor limite (t) que para a amostra observada de 47 pontos era de 1,30.

Observando o limite t, calculou-se a tendência para cada eixo observado (N, E) pelas fórmulas 4.2 e 4.3. Estes valores resultantes (tabela 40) foram comparados com o valor limite t para definir se há erros sistemáticos nas ortofotos.

TABELA 40 – Análise de tendência

	t_N	t_E
Limite t47 a 90%	1,30	1,30
Valor t calculado	2,96	5,25
Tendência	Sim	sim

Seguindo os mesmos passos do teste de tendência do experimento A, utilizou-se a distribuição CHI-Quadrado, com um nível de confiança de 90%, e o número total de observações (n). Na tabela da distribuição CHI-Quadrado, localizou-se o valor limite (X^2) que para a amostra observada de 47 pontos era de 59,78.

Com o limite X^2 definido, foi calculada a precisão das ortofotos nas diversas escalas e ainda para cada eixo observado (N, E), usando as fórmulas 4.4 e 4.5. Os valores resultantes foram comparados com o valor limite X^2 para definir se as ortofotos atendem à precisão estabelecida no decreto-lei 89.817 para os eixos (ver tabela 41).

TABELA 41 – Análise de Precisão Planimétrica (Classe A)

ESCALA	PRECISÃO	(Norte)	(Este)
1/1.000	Não	62,58	76,29
1/2.000	Sim	15,64	19,07
1/3.000	Sim	6,95	8,48
1/4.000	Sim	3,91	4,77
1/5.000	Sim	2,50	3,05
1/10.000	Sim	0,63	0,76

Para o experimento C, podemos verificar que a colocação de 4 pontos de apoio nos cantos do bloco melhorou os resultados obtidos, se comparados com o experimento B. Logo, podemos concluir que os resultados encontrados na avaliação estatística foram melhores do que o esperado para a escala 1/2.000, visto que o valor chi-quadrado permitido era de 59,78 e os valores encontrados foram 15,64 para o eixo norte e 19,07 para o eixo leste, bem abaixo do permitido. Isto nos leva a concluir que estas ortofotos atenderiam à exatidão da escala 1/1.500, sendo assim, o experimento C atingiu a mesma exatidão cartográfica do experimento A. Desta maneira, podemos classificar o experimento C como classe A pelo decreto 89.817/84. Porém, na análise de tendência, foram encontrados valores tendenciosos no eixo norte e no eixo leste. Como visto na análise da aerotriangulação, ainda existem erros sistemáticos nos dados. Isto nos leva a concluir que ainda devemos estudá-los mais detalhadamente.

4.5 EXPERIMENTO D – PRODUÇÃO DE ORTOFOTOS NA ESCALA 1/2.000, SEM PONTOS DE APOIO TOPOGRÁFICOS, DO VOO REALIZADO EM 07/05/2009

Primeiramente temos que processar os dados do SLSA (ver tópico 3.2.2). Após processados os dados, foram extraídos os valores dos POE (X'_0 , Y'_0 , Z'_0 , ω' , φ' , κ') do sensor laser no momento da tomada das imagens da CDPF que estão demonstrados nas tabela 42.

TABELA 42 – POE do SLSA no Momento da Tomada das Imagens Digitais

FOTO		POE – LASER					
		X'_0 (m)	Y'_0 (m)	Z'_0 (m)	ω' °	φ' °	κ' °
FAIXA 01	F_0072	679595,410	7189747,402	1921,026	0,031	1,309	249,886
	F_0073	679257,700	7189617,280	1920,491	1,614	1,598	250,077
	F_0074	678915,696	7189490,002	1920,816	0,499	1,172	250,335
	F_0075	678571,266	7189359,230	1918,199	-0,636	1,439	247,360
	F_0076	678228,143	7189219,570	1920,709	0,499	1,728	247,950
	F_0077	677884,152	7189079,264	1924,030	0,344	1,167	248,810
	F_0078	677538,406	7188937,053	1924,455	-1,545	0,997	248,404
	F_0079	677192,690	7188785,904	1924,635	1,373	0,904	248,533
	F_0080	676842,916	7188638,905	1923,413	1,638	1,214	250,202
	F_0081	676489,268	7188500,849	1922,802	0,769	1,224	249,931
	F_0082	676134,598	7188365,315	1926,437	-0,930	1,297	250,042
	F_0083	675782,153	7188224,244	1928,611	0,979	1,067	250,164
	F_0084	675428,911	7188083,991	1928,152	0,388	0,924	250,137
	F_0092	675374,082	7187703,566	1928,288	1,138	2,032	63,698
FAIXA 02	F_0093	675755,759	7187848,951	1927,196	0,021	3,041	63,913
	F_0094	676133,105	7187998,185	1929,037	2,050	2,355	64,340
	F_0095	676510,490	7188146,007	1930,921	1,870	1,969	62,866
	F_0096	676889,931	7188292,864	1933,314	0,437	2,317	64,951
	F_0097	677267,353	7188442,401	1933,943	2,981	1,889	64,522
	F_0098	677646,418	7188589,986	1929,707	1,896	1,533	64,068
	F_0099	678029,274	7188737,298	1928,635	-0,630	2,491	64,758
	F_0100	678408,499	7188887,917	1925,478	1,511	1,453	62,954
	F_0101	678792,370	7189037,678	1914,943	0,569	2,565	62,610
	F_0102	679175,214	7189184,400	1917,178	1,089	3,514	63,245
	F_0103	679550,664	7189331,720	1924,106	-0,001	2,944	62,010

Após processados os parâmetros de orientação exterior (X'_0 , Y'_0 , Z'_0 , ω' , φ' , κ') do sensor laser no momento da tomada das imagens, foram calculados os parâmetros de orientação exterior (X_0 , Y_0 , Z_0 , ω , φ , κ) de cada imagem, utilizando as fórmulas 3.1, 3.2 e 3.3 e as tabelas 10 e 21. Estes resultados estão na tabela 43.

TABELA 43 – POE das Imagens da CDPF

FOTO		POE – IMAGEM					
		X ₀ (m)	Y ₀ (m)	Z ₀ (m)	ω °	φ °	κ °
FAIXA 01	F_0072	679596,234	7189746,741	1920,970	-0,3088	1,8442	19,7855
	F_0073	679258,521	7189616,616	1920,435	-1,8918	2,1332	19,5945
	F_0074	678916,514	7189489,334	1920,760	-0,7768	1,7072	19,3365
	F_0075	678572,118	7189358,606	1918,143	0,3582	1,9742	22,3115
	F_0076	678228,988	7189218,937	1920,653	-0,7768	2,2632	21,7215
	F_0077	677884,988	7189078,618	1923,974	-0,6218	1,7022	20,8615
	F_0078	677539,246	7188936,413	1924,399	1,2672	1,5322	21,2675
	F_0079	677193,529	7188785,263	1924,579	-1,6508	1,4392	21,1385
	F_0080	676843,736	7188638,239	1923,357	-1,9158	1,7492	19,4695
	F_0081	676490,091	7188500,187	1922,746	-1,0468	1,7592	19,7405
	F_0082	676135,420	7188364,652	1926,381	0,6522	1,8322	19,6295
	F_0083	675782,973	7188223,579	1928,555	-1,2568	1,6022	19,5075
	F_0084	675429,732	7188083,326	1928,096	-0,6658	1,4592	19,5345
FAIXA 02	F_0092	675373,192	7187704,134	1928,232	1,4158	-2,5672	-154,0265
	F_0093	675754,871	7187849,523	1927,140	0,2988	-3,5762	-154,2415
	F_0094	676132,221	7187998,763	1928,981	2,3278	-2,8902	-154,6685
	F_0095	676509,592	7188146,562	1930,865	2,1478	-2,5042	-153,1945
	F_0096	676889,054	7188293,452	1933,258	0,7148	-2,8522	-155,2795
	F_0097	677266,471	7188442,982	1933,887	3,2588	-2,4242	-154,8505
	F_0098	677645,532	7188590,560	1929,651	2,1738	-2,0682	-154,3965
	F_0099	678028,395	7188737,883	1928,579	-0,3522	-3,0262	-155,0865
	F_0100	678407,602	7188888,474	1925,422	1,7888	-1,9882	-153,2825
	F_0101	678791,469	7189038,229	1914,887	0,8468	-3,1002	-152,9385
	F_0102	679174,319	7189184,961	1917,122	1,3668	-4,0492	-153,5735
	F_0103	679549,758	7189332,262	1924,050	0,2768	-3,4792	-152,3385

Depois de determinados os parâmetros de orientação exterior da CDPF, foram atribuídos os desvios padrões para as observações de entrada na aerotriangulação (ver tabela 31). Após atribuídos os desvios, foi realizada a aerotriangulação por bloco (tópico 3.2.2), para a produção de ortofotos. Os resultados desta aerotriangulação podem ser vistos nas tabelas 44 e 45.

TABELA 44 – Erro Médio Quadrático (RMSE) da Aerotriangulação

	Terreno			Imagem	
	X	Y	Z	x	y
RMSE nos Pontos de Verificação	3,4762 m	3,4538 m	5,4125 m	0,2911 pixel	0,2983 pixel
RMSE Total na Imagem	0,4845 pixel				

TABELA 45 – Resíduos nos Pontos de Verificação

	X (m)	Y (m)	Z (m)
75	-2,5737	-2,2821	6,846
76	-0,3084	0,3562	6,7741
77	1,8221	2,4147	7,2808
78	2,4097	2,1405	6,7893
79	4,5534	3,5261	7,6084
80	2,893	-0,1629	5,5193
81	0,8658	-2,1338	4,4824
82	3,7514	0,2134	5,8232
83	4,9323	1,0878	6,9449
84	-0,5446	-3,8319	3,7911
85	0,7961	-3,0132	3,9213
86	5,4987	1,0838	7,7385
87	4,2761	-1,4243	4,988
88	3,2312	-2,5679	4,5063
89	5,9616	-0,1182	6,2351
90	2,9192	-3,1601	4,0637
75	-2,5737	-2,2821	6,846
91	3,9267	-2,4614	4,6901
92	4,9924	-1,522	5,9904
93	-0,8506	-5,7088	2,487
94	4,5964	-2,0465	5,3631
95	1,6256	-4,4064	2,7108
96	4,5125	-2,3177	5,4819
97	5,6787	-1,2661	7,513
98	0,0596	-5,6038	-----
99	0,1842	-5,776	1,9383
100	3,8735	-4,1361	3,825
101	5,894	-2,3904	7,2273
102	0,3298	-6,7612	1,7083
103	0,1373	-6,7927	2,0236
Média	2,6037	-2,1492	5,0973
Desvio	2,3426	2,7499	1,8524

Ao verificar os resíduos dos pontos de verificação, observamos que a aerotriangulação apresentou resultados de desvio padrão fora do esperado, já que o desvio calculado é superior a um sigma teórico de 23 cm para as coordenadas X e Y e de 59 cm para a coordenada Z. Mais informações sobre sigma teórico, ver tópico 4.1. Outro resultado observado foi a média das coordenadas X, Y e Z, onde encontramos grandes tendências, ou seja, existem erros sistemáticos no processo da aerotriangulação. Este erro como comentado no tópico 4.1, pode ser de uma má calibração dos POI da CDPF ou da falta de precisão na determinação dos POE.

Depois de processada a aerotriangulação, foram geradas as ortofotos para análise da exatidão do georreferenciamento direto, ou seja, sem pontos de apoio.

Estas análises estatísticas foram realizadas nas diferenças entre o levantamento de campo e a ortofotos (tabela 46). As análises foram realizadas pelos testes de tendência e de precisão, usando como base a tabela do padrão de exatidão cartográfica – PEC (tabela 27).

TABELA 46 – Diferença entre o Levantamento de Campo (GPS) e as Ortofotos

APOIO	Diferenças	
	ΔE (m)	ΔN (m)
1	2,2604	1,7009
2	0,6587	-1,0132
3	-2,8256	-2,0052
4	-4,3701	-1,8517
5	-4,7971	-1,6248
6	-2,1733	0,4670
7	-1,6449	2,3115
8	-4,2279	0,1439
9	-4,8146	-0,4025
10	-1,3357	2,9549
11	0,1164	3,6683
12	-4,8223	0,8879
13	-4,9885	1,3663
14	-3,3244	2,3303
15	-4,2692	1,6103
16	-2,3803	2,9995
17	-3,2602	2,7237
18	-6,6037	1,8610
19	0,7266	5,5087
20	-5,6459	2,4277
21	-1,6266	4,2119
22	-4,3046	2,5527
23	-4,8363	2,4348
24	0,4048	4,8246
25	-0,2317	4,8404
26	-4,2110	3,5756
27	-4,3300	3,3854
28	-0,3186	4,7399
29	0,9146	4,2128
30	-3,2386	4,7546
Média	-2,6500	2,1866
Desvio	2,3317	2,1112

Seguindo os mesmos passos do teste de tendência do experimento A, utilizou-se a distribuição de *Student* (t), com um nível de confiança de 90% e o número total de observações (n). Na tabela da distribuição de *Student* (t), localizou-se o valor limite (t) que para a amostra observada de 30 pontos era de 1,31.

Observando o limite t , calculou-se a tendência para cada eixo observado (N, E) pelas fórmulas 4.2 e 4.3. Estes valores resultantes (tabela 47) foram comparados com o valor limite t para definir se há erros sistemáticos nas ortofotos.

TABELA 47 – Análise de tendência

	t_N	t_E
Limite t_{30} a 90%	1,31	1,31
Valor t calculado	6,23	5,67
Tendência	Sim	Sim

Seguindo os mesmos passos do teste de tendência do experimento A, utilizou-se a distribuição CHI-Quadrado, com um nível de confiança de 90% e o número total de observações (n). Na tabela da distribuição CHI-Quadrado, localizou-se o valor limite (X^2) que para a amostra observada de 30 pontos era de 40,30.

Com o limite X^2 definido, foi calculada a precisão das ortofotos nas diversas escalas e ainda para cada eixo observado (N, E), usando as fórmulas 4.4 e 4.5. Os valores resultantes foram comparados com o valor limite X^2 para definir se as ortofotos atendem à precisão estabelecida no decreto-lei 89.817 para os eixos (ver tabela 48).

TABELA 48 – Análise de Precisão Planimétrica (Classe A)

ESCALA	PRECISÃO	(Norte)	(Este)
1/1.000	Não	3503,61	2872,49
1/2.000	Não	875,90	718,12
1/3.000	Não	389,29	319,17
1/4.000	Não	218,98	179,53
1/5.000	Não	140,14	114,90
1/10.000	Sim	35,04	28,72

Para o experimento D, podemos verificar que os resultados obtidos na análise estatística foram superiores ao esperado para a escala 1/2.000, seguindo a mesma situação do experimento B, onde o valor chi-quadrado permitido era de 40,30 e os valores encontrados foram 875,90 para o eixo norte e 718,12 para o eixo leste, bem superior ao permitido. Isto no leva a observar que estas ortofotos atenderiam à

exatidão da escala 1/10.000 como classe A pelo decreto 89.817/84. Na análise de tendência foram verificados valores tendenciosos, tanto no eixo norte como no eixo leste. Como identificado na análise da aerotriangulação, ainda existem erros sistemáticos nos dados. Isto nos leva a concluir que ainda devemos estudá-los mais aprofundadamente.

4.6 EXPERIMENTO E – PRODUÇÃO DE ORTOFOTOS NA ESCALA 1/2.000, COM PONTOS DE APOIO TOPOGRÁFICOS, DO VOO REALIZADO EM 07/05/2006

Utilizando o processamento do SLISA do experimento D, foram extraídos os POE (X'_0 , Y'_0 , Z'_0 , ω' , ϕ' , κ') do sensor laser no momento da tomada das imagem da CDPF (ver tabela 42). Após processados os POE do sensor laser, foram calculados os POE (X_0 , Y_0 , Z_0 , ω , ϕ , κ) de cada imagem, utilizando as fórmulas 3.1, 3.2 e 3.3 e as tabelas 10 e 21. Estes resultados podem ser encontrados na tabela 43. Depois de determinados os POE da CDPF, foram atribuídos os desvios padrões para as observações de entrada na aerotriangulação (ver tabela 31).

Após atribuídos os pesos, foram inseridos os quatro pontos de apoio nos cantos do bloco para auxiliar o processo da aerotriangulação. Depois de inserido o apoio, foi realizada a aerotriangulação (tópico 3.2.2), para a produção de ortofotos. Os resultados desta aerotriangulação podem ser vistos nas tabelas 49 e 50.

TABELA 49 – Erro Médio Quadrático (RMSE) da Aerotriangulação

	Terreno			Imagem	
	X	Y	Z	x	y
RMSE nos Pontos de Apoio	0,0463 m	0,0231 m	0,0232 m	0,1863 pixel	0,3213 pixel
RMSE nos Pontos de Verificação	0,1930 m	0,1941 m	0,3888 m	0,2555 pixel	0,2709 pixel
RMSE Total na Imagem	0,4105 pixel				

TABELA 50 – Resíduos nos Pontos de Verificação

	X (m)	Y (m)	Z (m)
76	-0,0887	0,0079	-0,1207
78	0,0811	-0,1548	-0,2287
79	0,3107	-0,2922	-0,5247
80	-0,0058	-0,1786	0,3508
81	-0,2360	-0,2378	0,1876

Continua na Página 114

Continuação da TABELA 50

	X (m)	Y (m)	Z (m)
82	0,0193	-0,1910	0,2177
83	0,0366	-0,0560	0,5421
84	-0,3764	-0,2413	0,0012
85	-0,2791	-0,3465	0,0903
86	-0,0024	-0,0961	0,8838
87	0,3466	-0,1987	0,2537
88	0,0751	-0,1858	0,3331
89	0,3350	-0,1700	-0,0499
90	0,0688	-0,2103	0,2558
91	0,2146	-0,1845	0,1443
92	0,1490	-0,2163	0,4183
93	-0,1706	-0,2000	0,0885
94	0,1162	-0,1640	0,1865
95	0,1013	-0,0763	-0,0120
96	0,1432	-0,2416	0,4236
97	-0,1597	-0,0163	0,8954
98	-0,0164	-0,0619	-----
99	-0,1960	-0,1343	-0,1753
100	0,3236	-0,4087	-0,5542
102	-0,1641	-0,0702	-0,5647
104	0,0031	0,0338	0,1679
Média	0,0242	-0,1651	0,1284
Desvio	0,1952	0,1041	0,3745

Ao calcular os resíduos dos pontos de verificação, analisamos que a aerotriangulação apresentou resultados dentro do esperado, ou seja, os sigmas calculados estão inferiores ao sigma teórico de 23 cm para X e Y de 59 cm para Z. Mais informações sobre sigma teórico ver tópico 4.1.

Depois de processada a aerotriangulação, foram geradas as ortofotos para análise da exatidão do georreferenciamento direto com quatro pontos de apoio nos cantos do bloco. As análises estatísticas foram realizadas nas diferenças encontradas entre o levantamento de campo e a ortofotos (tabela 51). As análises foram realizadas pelos testes de tendência e de precisão, usando como base a tabela do padrão de exatidão cartográfica – PEC (tabela 31).

TABELA 51 – Diferença entre o Levantamento de Campo (GPS) e as Ortofotos

APOIO	Diferenças	
	ΔE (m)	ΔN (m)
1	0,1098	-0,1431
2	0,1815	-0,0567
3	0,0940	0,2167
4	-0,2143	0,0850
5	-0,2594	0,0307

Continua na Página 115

Continuação da TABELA 51

APOIO	Diferenças	
	ΔE (m)	ΔN (m)
6	0,0934	0,0612
7	0,2973	0,2276
8	0,1378	0,1041
9	-0,2026	-0,1227
10	0,3432	0,1887
11	0,2581	0,1404
12	-0,2351	0,0989
13	-0,4455	0,2372
14	-0,3145	0,1867
15	-0,2670	0,1059
16	-0,2282	0,1962
17	-0,1714	0,1770
18	-0,2442	0,1523
19	0,1060	0,2197
20	-0,1139	0,1744
21	-0,0603	0,3811
22	-0,1614	0,1445
23	-0,1411	0,2444
24	0,1279	0,0925
25	0,0923	0,1055
26	-0,1010	0,3312
27	-0,2829	-0,0823
28	0,1044	0,0707
29	0,0780	-0,0370
30	-0,2384	-0,2725
Média	-0,0553	0,1086
Desvio	0,2072	0,1424

Seguindo os mesmos passos do teste de tendência do experimento A, utilizou-se a distribuição de *Student* (t), com um nível de confiança de 90% e o número total de observações (n). Na tabela da distribuição de *Student* (t), localizou-se o valor limite (t) que para a amostra observada de 30 pontos era de 1,31.

Observando o limite t, calculou-se a tendência para cada eixo observado (N, E) pelas fórmulas 4.2 e 4.3. Estes valores resultantes (tabela 52) foram comparados com o valor limite t para definir se há erros sistemáticos nas ortofotos.

TABELA 52 – Análise de tendência

	t_N	t_E
Limite t47 a 90%	1,30	1,30
Valor t calculado	1,46	4,18
Tendência	Sim	Sim

Seguindo os mesmos passos do teste de tendência do experimento A, utilizou-se a distribuição CHI-Quadrado, com um nível de confiança de 90% e o número total de observações (n). Na tabela da distribuição CHI-Quadrado, localizou-se o valor limite (X^2) que para a amostra observada de 30 pontos era de 40,30.

Com o limite X^2 definido, foi calculada a precisão das ortofotos nas diversas escalas e ainda para cada eixo observado (N, E), usando as fórmulas 4.4 e 4.5. Os valores resultantes foram comparados com o valor limite X^2 para definir se as ortofotos atendem à precisão estabelecida no decreto-lei 89.817 para os eixos (ver tabela 53).

TABELA 53 – Análise de Precisão Planimétrica (Classe A)

ESCALA	PRECISÃO	(Norte)	(Este)
1/1.000	Sim	27,66	13,07
1/2.000	Sim	6,92	3,27
1/3.000	Sim	3,07	1,45
1/4.000	Sim	1,73	0,82
1/5.000	Sim	1,11	0,52
1/10.000	Sim	0,28	0,13

Para o experimento E podemos verificar que a colocação de quatro pontos de apoio nos cantos do bloco melhorou os resultados obtidos, se comparados com o experimento D. Logo, podemos concluir que os resultados encontrados na avaliação estatística foram melhores do que o esperado para a escala 1/2.000, visto que o valor chi-quadrado permitido era de 59,78 e os valores encontrados foram 6,92 para o eixo norte e 3,27 para o eixo leste, bem abaixo do permitido. Isto nos leva a concluir que estas ortofotos atenderiam à exatidão da escala 1/1.000. Sendo assim, o experimento E melhorou a exatidão cartográfica do experimento A. Desta maneira, podemos classificar o experimento E como classe A pelo decreto 89.817/84. Porém, na análise de tendência, foram encontrados valores tendenciosos no eixo norte e no eixo leste, isto nos leva a concluir que ainda devemos estudá-los mais detalhadamente.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

No que se refere ao objetivo geral da presente pesquisa, a metodologia proposta para o georreferenciamento direto de imagens digitais aéreas de pequeno formato, utilizando dados do Sistema de Navegação Inercial – SNI do Sistema Laser Scanner Aerotransportado – SLSA, visando à produção de ortofotos na escala 1/2.000, atendeu as expectativas quando foram utilizados quatro pontos de apoio. Porém, quando não foram utilizados estes pontos de apoio, a ortofoto gerada conseguiu chegar à exatidão da escala 1/5.000.

Logo, podemos concluir que, para se fazer um georreferenciamento direto com o método proposto nesta pesquisa, ainda existe a necessidade mínima de se levantar pelo menos quatro pontos de apoio nos cantos do bloco. Estes pontos entram na aerotriangulação para refinar os parâmetros de orientação exterior obtidos via SNI. Isto é necessário, devido à falta de exatidão na determinação dos valores de rotação ($\Delta\omega$, $\Delta\phi$) (ver tabelas 19 e 20) entre o Sistema de Navegação Inercial do SLSA e a Câmara Digital de Pequeno Formato – CDPF.

Outra conclusão à qual podemos chegar é que, no intervalo de tempo entre 24/10/2006 e 07/05/2009 (32 meses), os valores de rotação e translação (ΔX_0 , ΔY_0 , ΔZ_0 , $\Delta\omega$, $\Delta\phi$, $\Delta\kappa$) determinados no aerolevanteamento de 24/10/2006 ainda podem ser utilizados, sempre com a ressalva de se manter pelo menos quatro pontos de apoio nos cantos do bloco, já que foram obtidos resultados similares nas ortofotos do aerolevanteamento de 07/05/2009.

Da determinação do braço e do giro entre o SNI do SLSA e a CDPF, podemos concluir que o braço (ΔX_0 , ΔY_0 , ΔZ_0) pode ser facilmente determinado por topografia, utilizando estações totais de precisão ($\pm 7''$). Já quanto ao giro ($\Delta\omega$, $\Delta\phi$, $\Delta\kappa$), por se tratar de ângulos, existe uma dificuldade em determiná-lo, uma vez que a CDPF foi instalada diretamente no piso da aeronave, ou seja, sem uma base de giro estabilizada. Assim a CDPF sofre com as vibrações do voo. Cabe aqui lembrar que a CDPF teve que ser instalada diretamente no piso porque o SLSA também estava

instalado no piso da aeronave e a CDPF devia ter os mesmo valores de atitude do SLSA. A fim de diminuir esta vibração, a caixa de acrílico (ver figuras 27 e 28) foi dimensionada de maneira que a CDPF ficasse o mais justa possível, porém ainda existia espaços vazios entre a CDPF e a caixa. Para preencher estes espaço, foi utilizada uma espuma expansível de poliuretano, diminuindo assim as vibrações encontradas durante o voo. Outro item fundamental no georreferenciamento direito do método proposto na pesquisa foi a criação do cabo de conexão da CDPF com o SLSA (ver figura 29), pois sem o cabo não seria possível realizar a determinação do giro e os experimentos feitos na pesquisa.

Do campo de calibração, concluímos que os alvos pré sinalizados foram de sumária importância na determinação do giro, pois foram utilizados 37 pontos de apoio na aerotriangulação, podendo assim encontrar valores de giro o mais próximos possível da realidade. Estes alvos também foram importantes na verificação da exatidão cartográfica das ortofotos, possibilitando avaliar melhor as diferenças encontradas (E, N) entre o levantamento de campo e as ortofotos.

E por fim, concluímos que, apesar deste método ainda precisar de pontos de apoio nos cantos do bloco, ele apresenta vantagens sobre o método convencional. Esta vantagens são: mínimo de pontos de apoio, uma vez que para se realizar uma ortofoto desta mesma área pelo método convencional seriam necessários pelo menos, 13 pontos de apoio; eliminação da restituição estereoscópica na determinação do modelo digital de terreno – MDT; todo o processo é automatizado; rapidez e baixo custo na obtenção do produto final; e a possibilidade de se realizar ortofotos em lugares de difícil acesso, como por exemplo, regiões florestais, lagos, áreas litorâneas e ilhas.

5.1.1 Classificação das Ortofotos Produzidas nos Experimentos

Todo produto cartográfico (ortofotocartas) confeccionado no Brasil deve ser classificado de acordo com as instruções reguladoras previstas no Decreto 89.817/84. De acordo com o referido decreto, os padrões de exatidão planimétricos

são definidos em função do denominador da escala e devem ser classificados segundo uma classe, que pode ser A, B ou C, conforme tabela 27. Logo, as ortofotos realizadas nos experimentos A, B, C, D e E, foram analisadas estatisticamente e classificadas segundo a sua exatidão.

Ao analisar o Experimento A, por georeferenciamento indireto, utilizando 13 pontos de apoio conforme os padrões da Fotogrametria, podemos ver que os resíduos dos pontos de verificação da aerotriangulação apresentaram resultados de desvio padrão dentro do esperado ($X=0,3699\text{m}$, $Y=0,3907\text{m}$ e $Z=0,5744\text{m}$), já que o desvio calculado é inferior a um sigma teórico, ou seja, sigma de 23 cm para as coordenadas X e Y e sigma de 59 cm para a coordenada Z. Porém, se for observada a média da coordenada Z ($-1,1331\text{m}$), encontramos uma tendência no resultado, ou seja, um erro sistemático no processamento da aerotriangulação. Este erro sistemático pode vir de dois fatores, o primeiro pode ser de uma má calibração dos parâmetros de orientação interior – POI da CDPF, e o segundo fator pode ser da falta de precisão na determinação dos POE do SNI. Quanto aos resultados encontrados na avaliação estatística, concluímos que, foram melhores do que o esperado para a escala 1/2.000, visto que o valor chi-quadrado permitido era de 59,78 e os valores encontrados foram 24,73 para o eixo norte e 29,86 para o eixo leste, bem abaixo do permitido. Isto nos leva a concluir que estas ortofotos atenderiam à exatidão da escala 1/1.500, podendo assim classificá-las como classe A pelo decreto 89.817/84. Porém, na análise de tendência, foram encontrados valores tendenciosos no eixo norte. Como visto na análise da aerotriangulação, ainda existem erros sistemáticos nos dados. Isto nos leva a crer que ainda devemos estudá-los mais detalhadamente.

No experimento B, por georeferenciamento direto sem a utilização de pontos de apoio, ao verificar os resíduos dos pontos de verificação, analisamos que a aerotriangulação apresentou resultados de desvio padrão fora do esperado ($X=1,3632\text{m}$, $Y=0,9197\text{m}$ e $Z=1,5668\text{m}$), uma vez que o desvio calculado é superior a um sigma teórico de 23 cm para as coordenadas X e Y e de 59 cm para a coordenada Z. Outro resultado observado foi a média das coordenadas X, Y e Z ($X=0,5425\text{m}$, $Y=-1,2492\text{m}$, e $Z=2,6751\text{m}$), onde encontramos grandes tendências, ou seja, existem erros sistemáticos no processo da aerotriangulação. Este erro pode

ser oriundo de uma má calibração dos parâmetros de orientação interior – POI da CDPF, ou de uma falta de precisão na determinação dos POE do SNI. Nas análises estatísticas da ortofotos, foram encontrados resultados superiores ao esperado para a escala 1/2.000, onde o valor chi-quadrado permitido era de 59,78 e os valores encontrados foram 346,06 para o eixo norte e 187,95 para o eixo leste, bem superior ao permitido. Isto nos leva a observar que estas ortofotos atenderiam à exatidão da escala 1/5.000 como classe A pelo decreto 89.817/84. Na análise de tendência, foram verificados valores tendenciosos, desta vez no eixo leste. Como identificado na análise da aerotriangulação, ainda existem erros sistemáticos nos dados. Isto nos leva a concluir que ainda devemos estudá-los mais aprofundadamente.

No experimento C, com a utilização de quatro pontos de apoio nos cantos do bloco para o georeferenciamento direto, ao calcular os resíduos dos pontos de verificação, analisamos que a aerotriangulação apresentou resultados distintos ($X=0,2379\text{m}$, $Y=0,3801\text{m}$ e $Z=0,4749\text{m}$), uma em que o desvio do eixo X está aproximadamente igual a um sigma teórico de 23 cm. Já o eixo Y tem um valor superior ao sigma teórico. Isto aconteceu devido a algum problema na leitura dos pontos fotogramétricos. Porém, o desvio padrão do eixo Z está bem abaixo do sigma teórico que era de 59 cm, atendendo às expectativas da aerotriangulação. Outro resultado analisado foi a média ($X=0,2962\text{m}$, $Y=0,3400\text{m}$ e $Z=0,8987\text{m}$) das coordenadas X, Y e Z. Nestas, encontramos valores tendenciosos. Este erro como comentado anteriormente pode ser oriundo de uma má calibração dos POI da CDPF ou de uma falta de precisão na determinação dos POE do SNI. Neste experimento, podemos verificar que a colocação de 4 pontos de apoio refinou os resultados obtidos, se comparados com o experimento B. Logo, podemos concluir que os resultados encontrados na avaliação estatística foram melhores do que o esperado para a escala 1/2.000, visto que o valor chi-quadrado permitido era de 59,78 e os valores encontrados foram 15,64 para o eixo norte e 19,07 para o eixo leste, bem abaixo do permitido. Isto no leva a concluir que estas ortofotos atenderiam à exatidão da escala 1/1.500. Sendo assim, o experimento C atingiu a mesma exatidão cartográfica do experimento A. Desta maneira, podendo classificar o experimento C como classe A pelo decreto 89.817/84. Porém, na análise de tendência foram encontrados valores tendenciosos no eixo norte e no eixo leste.

Como visto na análise da aerotriangulação, ainda existem erros sistemáticos nos dados. Isto nos leva a concluir que ainda devemos estudá-los mais detalhadamente.

No experimento D, sem a utilização de pontos de apoio no georeferenciamento direto, verificamos que os resíduos dos pontos de verificação na aerotriangulação apresentou resultados de desvio padrão ($X=2,3426\text{m}$, $Y=2,7499\text{m}$, e $Z=1,8524\text{m}$) fora do esperado, já que o desvio calculado é superior a um sigma teórico de 23 cm para as coordenadas X e Y e de 59 cm para a coordenada Z. Outro resultado observado foi a média ($X=2,6037\text{m}$, $Y=-2,1492\text{m}$ e $Z=5,0973\text{m}$) das coordenadas X, Y e Z, onde encontramos grandes tendências. Estas tendências como nos experimentos anteriores, podem ser oriundas de uma má calibração dos POI da CDPF ou da falta de precisão na determinação dos POE. Já os resultados obtidos nas análises estatísticas das ortofotos, foram superiores ao esperado para a escala 1/2.000, seguindo a mesma situação do experimento B, onde o valor chi-quadrado permitido era de 40,30 e os valores encontrados foram 875,90 para o eixo norte e 718,12 para o eixo leste, bem superior ao permitido. Isto no leva a observar que estas ortofotos atenderiam à exatidão da escala 1/10.000 como classe A no decreto 89.817/84. Na análise de tendência, foram verificados valores tendenciosos, tanto no eixo norte com no eixo leste. Como identificado na análise da aerotriangulação, ainda existem erros sistemáticos nos dados. Isto nos leva a concluir que ainda devemos estudá-los mais aprofundadamente.

No experimento E, utilizando quatro pontos de apoio nas extremidades do bloco para o georeferenciamento direto, ao determinar os resíduos dos pontos de verificação, analisamos que a aerotriangulação apresentou resultados dentro do esperado, ou seja, os sigmas calculados ($X=0,1952\text{m}$, $Y=0,1041\text{m}$ e $Z=0,3745\text{m}$) estão abaixo do sigma teórico de 23 cm para X e Y de 59 cm para Z. Logo, para o experimento podemos verificar que a colocação de 4 pontos de apoio nos cantos do bloco melhorou os resultados obtidos, se comparados com o experimento D. Assim, podemos concluir que os resultados encontrados na avaliação estatística foram inferiores ao esperado para a escala 1/2.000, visto que o valor chi-quadrado permitido era de 59,78 e os valores encontrados foram 6,92 para o eixo norte e 3,27 para o eixo leste, bem abaixo do permitido. Isto no leva a concluir que estas ortofotos atenderiam à exatidão da escala 1/1.000. Sendo assim, o experimento E

melhorou a exatidão cartográfica do experimento A. Desta maneira, podemos classificá-lo como classe A pelo decreto 89.817/84. Porém, na análise de tendência, foram encontrados valores tendenciosos no eixo norte e no eixo leste. Isto nos leva a concluir que ainda devemos estudá-los mais detalhadamente.

E por fim, podemos concluir que as exatidões atingidas pelos experimentos são influenciadas pela altura do aerolevante, pois quanto mais baixo for o voo maior é a precisão. Para o aerolevante na altura de 1.000 m, a precisão pode chegar a 0,25 m na planimetria e, para um levantamento na altura de 2.000 m, a precisão pode chegar a 1,8 cm para planimetria. Esta variação de precisão conforme a altura de voo está vinculada principalmente ao SNI do SLSA que tem uma precisão de $\pm 0,015^\circ$. Outras influências na exatidão dos experimentos estão na resolução da imagem que também é influenciada pela altura de voo e na dificuldade de leitura dos pontos fotogramétricos, como pontos de ligação, de verificação e de apoio.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Como ainda não foi possível produzir ortofotos pelo método proposto na pesquisa, utilizando o georreferenciamento direto sem a utilização de pontos de apoio, recomenda-se aqui que ainda sejam feitas mais pesquisas para se refinar a determinação dos valores de rotação ($\Delta\omega$, $\Delta\phi$), entre o Sistema de Navegação Inercial do SLSA e a Câmara Digital de Pequeno Formato – CDPF.

Como esta pesquisa limitou-se a uma área de 10 km² e a uma altura de aerolevante de 1000 m, recomenda-se aqui que sejam efetuadas pesquisas com áreas maiores para a verificação mínima de pontos de apoio em alturas variadas, afim de verificar o comportamento da determinação do braço e principalmente do giro (ΔX_0 , ΔY_0 , ΔZ_0 , $\Delta\omega$, $\Delta\phi$, $\Delta\kappa$), bem como das precisões alcançadas nas ortofoto produzidas por este método.

Para a refinamento da precisão dos experimentos, é recomendável a calibração periódica dos equipamentos (SLSA e CDPF), uma vez que é de praxe mundial e deveria ser também no Brasil. Para o SLSA, deveria-se realizar voos de

calibração altimétrica e planimétrica para cada nova missão. Já para a CDPF, deveria-se calibrar os parâmetros de orientação interior a cada ano. Nestas calibrações do SLSA e da CDPF, deveriam ser apresentados os resultados das análises estatísticas dos erros encontrados, os parâmetros resultantes, bem como a metodologia adotada em relatório de conclusão dos serviços.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERMANN, F. **Airborne LASER Scanning: present status and future expectations**. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing v.54 – ISPRS, 1999.

ANDRADE, J. B. **Photogrammetric Refracion**. Theses of doctarete, Ohio State University, 1977.

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 1998.

AMORIM, A.; TOMMASELLI, ANTONIO MARIA GARCIA ; SILVA, J. F. C. **Fotogrametria Analítica Aplicada às Câmaras de Pequeno Formato**. In: XIV Congresso Brasileiro de Cartografia, 1989, Gramado RS., 1989. v. 1.

AMORIM, A. **Utilização de Câmaras de Pequeno Formato no Cadastro Técnico Urbano**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 1993.

ARAKI, H. **Fusão de Informações Espectrais, Altimétricas e de Dados Auxiliares na Classificação de Imagens de Alta Resolução Espacial**. Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

BALTSAVIAS, E. P. **A comparison between Photogrammetry and LASER scanning**. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing v.54 – ISPRS, 1999.

BARBOSA, R.L. **Geração de Modelo Digital do Terreno por aproximações sucessivas utilizando câmaras digitais de pequeno formato**. Dissertação de Mestrado, UNESP-PP, 1992.

BARBOSA, F. P.; MITISHITA, E. A. **Verificação da Estabilidade Geométrica dos Parâmetros de Calibração de uma Câmara Digital de Pequeno Formato SONY DSC-F717**. Série em Ciências Geodésicas, 2003.

BÄER, H.; WIESEL, J. K. **Cost-Benefit Analysis of Digital Orthophoto Technology.** Papers. In Digital Photogrammetric Systems. Eds. Ebner, H.; Frirsch, D.; Heipke, C. Wichmann. 1991.

BONIFACE, P. R. J. **Softcopy Production of Orthophoto and DEM.** Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. v.58. Colorado, U.S.A, 1992.

BROWN, G. B.; HWANG, P. Y. C. **Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering.** John Wiley & Sons, USA, 1997.

BRANDALIZE, M. C. B. **A Qualidade Cartográfica dos Resultados do Laser Scanner Aerotransportado.** Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFSC, Florianópolis, 2004.

BRASIL, Decreto n. 89.817 de 20 de junho de 1984. **Normas Técnicas da Cartografia Nacional.** Brasília, Diário Oficial da União, 1984.

BRITO, N. L. **Precision of Digital Orthoimages: Assessment and Application to the Occlusion Detection Problem.** School of the Ohio State University. Ohio, 1997.

BROWN, G. B.; HWANG, P. Y. C. **Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering.** John Wiley & Sons, USA, 1997.

CAMARGO, P. **Controle de Qualidade Aplicado ao Filtro de Kalman.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1992.

CHATFIELD, A. B. **Fundamentals of High Accuracy Inertial Navigation Systems.** American Institute of Aeronautics and Astronautics, Ohio, USA, 1997.

CRAMER, M. **GPS/INS integration.** Fritsch/Hobbie (eds.): Photogrammetric Week 97, Wichmann Verlag, Heidelberg, Germany, 1997.

CRAMER, M.; STALMANN, D.; HAALA, N. **Using GPS/Inertial exterior orientation measurements for photogrammetric point determination**. ISPRS Workshop Com. III.1: "Direct versus indirect methods of sensor orientation". Barcelona, 1999.

DISPERATI, A. A. **Obtenção e uso de fotografias de pequeno formato**. Ed. Universidade Federal do Paraná - UFPR, Fundação de Pesquisas Florestais - FUPEF, Curitiba, PR, 1991.

DUBAYAH, R. O. **Land surface characterization using LIDAR remote sensing**. In: Spatial information for land use management. Singapore: International Publishers Direct, 2000.

FLOOD, M. **Laser altimetry: from science to commercial LIDAR mapping**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. EUA, 2003.

GALO, M. **Calibração e Aplicação de Câmaras Digitais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Parana, Curitiba, Pr. 1993, P. 151.

GELB, A. **Applied Optimal Estimation**. The M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1974.

GONÇALVES, G. A. **Detecção Automática de Alterações na Cartografia Cadastral com Base em Imagens de Câmaras Digitais**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

HABIB, A.; MORGAN, M. **Small Format Digital Câmeras for Mapping Applications: Calibration and Stability Analysis**. Série em Ciências Geodésicas Vol. 3. P.3-25. Curitiba, 2003.

HABIB, A.; MORGAN, M. **Stability Analysis and Geometric Calibration of Off-the-Shelf Digital Cameras**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, v. 71, n. 6, p. 733, 2005.

HARTMANN, C; SVALDI, A D. **Localização das Redes de Pesca de Camarão (Saquinho) Utilizando Aerofotos Georreferenciadas: Região Estuarina da Laguna dos Patos**. Revista Atlântica, Rio Grande, 24(1): 5-10, 2002.

IBGE – Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Recomendações para Levantamentos Relativos Estáticos – GPS**. Rio de Janeiro, 2008.

JONAS, D. E.; BYRNE, P. **Airbone laser scanning: beyond its formative years**. In: Spatial Sciences Conference – Spatial Knowledge without Boudaries, Canberra, 2003.

JUBANSKI, J. J. **Desenvolvimento e Avaliação de um Sistema de voo Apoiado por GPS para Aerotriangulação por Feixes de Raios**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

LILLESAND, T. M. E.; KIEFER, R. W. **LIDAR**. In: Remote sensing and image interpretation. 4 ed. New York: John Wiley & Sons, 2000.

LIMA, O; LOCH, C. **O Uso de Câmaras Fotográficas de Pequeno Formato nos Levantamentos Cartográficos Destinados ao Cadastro Técnico Multifinalitário**. COBRAC 98 - Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. Florianópolis, 1998.

LUGNANI, J. B. **Introdução à Fototriangulação**. Editora UFPR, Curitiba, 1987.

MACHADO, A. M. L.; MITISHITA, E. A.; SANTOS, R. L.; BARBOSA, F. P. **Verificação da Estabilidade Geométrica dos Parâmetros de Calibração de uma Câmara Digital de Pequeno Formato Sony DSCF717.** Séries em Ciências Geodésicas, v. 3, pp. 2-25, 2004.

MACHADO, A. M. L. **Extração Automática de Contornos de Edificações Utilizando Imagem Gerada por Câmara Digital de Pequeno Formato e Dados LiDAR.** Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

MARTINS, M. A. R.; FELIX, D.; KERSTING, A. P. B. **Análise do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) para dados provenientes do sistema laser – ALTM 2050.** In: 3º COBRAC, Florianópolis – SC, 2004.

MITISHITA, E. A.; SILVA, VILMAR, F.; SIKORSKI, J. **Desenvolvimento de Técnicas de Mapeamento Fotogramétrico com Base em Imagens Digitais Tomadas com Câmara de Vídeo e Helicóptero.** Série em Ciências Geodésicas, Pós-Graduação em Ciências Geodésicas no Brasil. V-1, p. 181-198, 2001.

MITISHITA, E. A.; HABIB, A.; CENTENO, J.; MACHADO, A. L.; LAY, J.; WONG, C. **Photogrammetric and Lidar Data Integration Using the Centroid of a Rectangular Roof as a Control Point.** The Photogrammetric Record 23(121), 2008.

MOHINDER, S. G; WEILL, L. R.; ANDREWS, A. P. **Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration.** John Wiley & Sons, USA, 2001.

OLIVAS, M. A. A. **Calibração de Câmaras Fotogramétricas; Aplicação dos Métodos: Câmaras Convergentes e Campos Mistos.** Dissertação (Mestrado em Fotogrametria - CPGCG), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1980.

OPTECH. **User Guide – ALTM2050.** Toronto, 2002.

OPTECH. <http://www.optech.on.ca/>. Website, 2008

OPTEN. <http://www.optensolutions.com/>. Website, 2004

PAPOULIS, A. **Probability, Random Variables, and Stochastic Process**. McGraw Hill, Singapore, 1991.

REZENDE, F. V. **Mosaico Digital Semi-Controlado Obtido de Aerofotos Coloridas Não Métricas**. Monografia de Especialização em Geoprocessamento. Universidade Federal de Minas Gerais, 2001.

ROGERS, R. M. **Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems**. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Ohio, USA, 2000.

SANTANA, D. D. S.; CAMPOS, V. A.; FURUKAWA, C. M.; MARUYAMA, N. **Estimação de Trajetórias Utilizando Sistema de Navegação Inercial – “Strapdown”**. Laboratório de Sensores e Atuadores, Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

SANTOS, D. R.; DAINEZ, R. A.; RODRIGUES, Z. J.; TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M.; HASEGAWA, J. K. **Aplicação de Câmaras Digitais na Produção de Ortofotocarta**. In: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário (COBRAC). Florianópolis, 2000.

SANTOS, R. L. **Calibração de Câmaras Digitais Não-Métricas e de Pequeno Formato Utilizando o Pixel como Unidade no Espaço Imagem**. Seminário de Tópicos Avançados em Fotogrametria. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR. Curitiba, 2003.

SANTOS, R. L. **Extração Automática de Pontos de Apoio para Integração de Imagens Aéreas Digitais e Dados de Perfilamento Laser Aerotransportado**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

SATO, S. S. **Aplicação e Análise da Ortofoto Digital na Definição de Limites de Propriedades Imobiliárias - Estudo de Caso: Imóveis da Universidade Federal de Santa Catarina**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Opção Cadastro Técnico Multifinalitário, UFSC, Florianópolis, 1996.

SCHUMACHER, D. H. **Metodologia de Produção de Mapas para o Cadastro Técnico Multifinalitário a partir de Fotografias Aéreas de Pequeno Formato, Controle Terrestre e Geoprocessamento**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Opção Cadastro Técnico Multifinalitário, UFSC, Florianópolis, 1995.

SILVA, D. C.; MELO, I. D. F.; OLIVEIRA, R. N. Q. **Alta Resolução com Uso de Câmaras Digitais de Baixo Custo para Mapeamento**. In: Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Goiânia, 2005.

SILVA, I. **Curso de Fotogrametria Digital**. Congresso ExpoGEO; 1999.

SLOBODA, L. **Proposta Metodológica para Confecção de base Cartográfica a Partir de Dados Oriundos do Sistema Laser Scanner**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Opção Cadastro Técnico Multifinalitário, UFSC, Florianópolis, 2005.

ŠKALOUD, J. **Strap-down INS Orientation Accuracy with GPS Aiding**. Report n°. 20079, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Canada, 1995.

ŠKALOUD, J.; CRAMER, M.; SCHWARZ, K.P. **Exterior Orientation without Ground Control**. Proc. of the International Symposium of Photogrammetry and Remote Sensing ISPRS, Commission III, pp. 125-130, Vienna, Austria, July 1996.

TITTERTON, D. H.; WESTON, J. L. **Strapdown Inertial Navigation Technology**. Peter Peregrinus Ltd, United Kingdom, 1997.

TOMMASELLI, A. M. G., SANTOS, D. R. **Uma estratégia para extração semiautomática de feições com análise do MNE.** Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico e Multifinalitário – COBRAC, Florianópolis, 2000.

WEI, M.; SCHWARZ, K.P. **Testing a Decentralized Filter for GPS/INS Integration.** Proc. of the IEEE PLANS – Position, Location and Navigation Symposium, Las Vegas, Nevada, 1990.

WEHR, A. E.; LOHR, U. **Airborne Laser Scanning: an introduction and overview.** Journal Of Photogrammetry And Remote Sensing v.54 – ISPRS, 1999.

WEVER, C. E.; LINDENBERGER, J. **Experiences of 10 years laser scanning.** In: Photogrammetric Week, Stuttgart, 1999.